

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.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

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 28.12.2019. Бумага офсетная 65 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.

Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 16,53. Тираж 100 экз. Заказ 1089.

АРХИТЕКТУРА

УДК 72.03(476.5)

УСАДЬБА ГРЕБНИЦКИХ И ПРИЛЕГАЮЩАЯ К НЕЙ ТЕРРИТОРИЯ В АГРОГОРОДКЕ ОРЕХОВНО УШАЧСКОГО РАЙОНА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

канд. архитектуры, доц. Г.И. ЗАХАРКИНА; М.В. КАБАЕВА
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается современное архитектурно-планировочное состояние усадьбы Гребницких. Приведены результаты натурных обследований ее территории, зеленых насаждений, конструкций здания и его основных частей. Выявлены композиционные особенности фасадов здания и плана первого этажа. Даны краткие характеристики архитектурных стилей применительно к садово-парковому строительству. Предложен план организации предпроектных работ по восстановлению и адаптации усадьбы.

Ключевые слова: дворцово-усадебный комплекс, ландшафтная архитектура, пространство, среда, композиция, барокко, классицизм, конструкции, методы восстановления, дендрология.

Введение. В 2017 году в Государственном списке историко-культурных ценностей Республики Беларусь зарегистрировано 1763 объекта архитектуры, в число которых входят 1200 старинных поместий и усадеб, в том числе их фрагментов [1]. Однако почти все старинные усадьбы Витебщины находятся в запустении и представлены только фрагментами былой застройки: полуразрушенными жилыми зданиями, хозяйственными постройками и заброшенными парками. В последние годы XX века практически ничего не предпринималось с целью их сохранения (консервации) и последующего восстановления.

В настоящее время актуальность данной проблемы приобрела особенную остроту. Внимание общественности и архитекторов обращено к проблеме возвращения в историко-культурную среду объектов градостроительного и ландшафтного наследия, в частности усадебных комплексов. В Ушачском районе Витебской области от прошлых веков дошли до настоящего времени только несколько небольших церквей, костелов и среднепоместных дворянских усадеб. Один из таких объектов – *усадьба Гребницких в агрогородке Ореховно Ушачского района* (свидетельство (удостоверение) № 234/261-1062 о государственной регистрации в едином государственном регистре недвижимого имущества, прав на него и сделок с ним Республики Беларусь от 26.09.2008) [1].

Краткий обзор истории усадебной архитектуры Беларуси

На землях Великого Княжества Литовского (XIII–XVIII вв.) большая часть небольших провинциальных усадеб проектировалась и создавалась местными талантливыми мастерами. Однако новейшие идеи западноевропейского градостроительного и паркового искусства, внедрявшиеся в исторических городах ВКЛ и замковых комплексах крупных магнатов, проникали и в архитектуру небольших усадеб.

Так, например, в конце XVIII века формирование усадебных ансамблей происходило на основе простого, но рационального планировочного приема, возникшего в западноевропейской архитектуре барокко, – усадебный комплекс располагался на планировочной оси поселения, а его главное здание (дворец) замыкало перспективу главной улицы. В зависимости от конкретных ландшафтных условий расположение усадебных комплексов могло быть обособленным от поселения, но не теряло своей главной функции – центра владения [2]. Особенно привлекательными для владельцев небольших поместий на территориях Великого Княжества были образцы позднего итальянского барокко.

В ландшафтной архитектуре периода позднего классицизма (к концу XVIII в.) также стали проявляться новые тенденции, например, в планировке парков появились примеры совмещения в единой пространственной композиции *регулярной и пейзажной* планировочных схем. А в начале XIX века архитекторы и паркостроители стали свободно трактовать каноны архитектуры и садово-паркового искусства – в этот период архитектура позднего классицизма уже начала развиваться в направлении эклектизма [2].

Усадебное строительство на территории современной Беларуси в конце XVIII – начале XIX века стало активно развиваться, так как на землях ВКЛ, присоединенных к Российской империи после третьего раздела Речи Посполитой, российским правительством были созданы условия для развития и укрепления помещичьего хозяйства – за местными помещиками, которые принесли присягу царскому правительству, сохранялись и распространялись привилегии российского дворянства. Покинутые поместья передавались во владения российским подданным. Правительственные льготы активизировали быстрое развитие специализированной помещичьей системы хозяйствования, так называемой фольварочной системы, и способствовали росту производства продукции. Это вовлекало землевладельцев в предпринимательскую деятельность, что, в свою очередь, повышало их благосостояние и позволяло проводить реконструкцию

и совершенствование своих владений [2]. В связи с развитием техники и строительства в XIX веке повсеместно увеличился спрос на техническую древесину и, как следствие, в частных лесных хозяйствах началось разведение новых видов деревьев, а в некоторых усадьбах Беларуси закладывались насаждения сосны веймутовой и черной, лиственниц, ели сизой, лжетсуги, белой акации, ранее считавшихся экзотами [3].

Основная часть. В Витебской области в пяти километрах от городского поселка Ушачи, на южном берегу озера Ореховно находится здание старинной усадьбы Гребницких [4].

Поселение Ореховно упоминалось в исторических документах ВКЛ с 1554 года [5]. В течение последующих трех столетий поместье переходило к разным владельцам, и архитектурный облик усадьбы периодически менялся. На длинном пути своего существования усадьба Ореховно, как и все исторические усадьбы, сохранившиеся на территориях современной Беларуси, перенесла расширение и сокращение, частичную функциональную перепланировку хозяйственных зон и участков, почти полное разрушение жилых зданий и истребление парковых насаждений.

Для достижения цели по восстановлению архитектурного облика усадьбы Гребницких в течение 2017–2019 годов в рамках Государственной научно-исследовательской работы ГБ 3316 «Проблемы и тенденции развития архитектуры Белорусского Подвинья» были поставлены задачи по проведению обследования и анализу архитектурно-планировочных решений здания и парковой зоны усадьбы Гребницких. Сотрудники кафедры «Архитектура» Полоцкого государственного университета проделали работу по обследованию, фотофиксации и составлению кроков здания и парка (рисунок 1).



а



б



в

а – фотоснимок А. Кулагина, 1978 г.; б – фотоснимок А. Дыбовского, 2013 г.;
в – фотоснимок Г. Захаркиной, 2019 г.

Рисунок 1. – Главный фасад усадебного дома Гребницких в Ореховно

Объемная композиция П-образного в плане здания сформирована двухэтажной центральной его частью и одноэтажными боковыми крыльями. Основной объем здания, размещенный на оси симметрии, на главном фасаде выделен ризалитом с треугольным фронтоном, а на фасаде, выходящем в парк, – ризалитом с выступающим полукруглым эркером. Второй этаж главного фасада украшен балконом.

Обращает на себя внимание асимметрия композиции главного фасада дома – четырехколонный портик с прямоугольным аттиком смещен далеко вправо от оси симметрии, с целью выделения главного входа.

Следует отметить, что в архитектурной среде первой половины XIX века отказ от классической симметричной композиции (например, сочетание функциональной симметричной планировки здания с оригинальной композицией ордера фасада) был признан *новым приемом обогащения пластики фасада*. Как подчеркивает А.Н. Кулагин, «Децентрализацию (симметричной композиции) стали активно использовать с 30-х годов XIX века в архитектуре позднего классицизма (усадьба Ореховно)» [2, с. 80].

На основе материалов авторского обследования и документов, представленных Ушачским бюро недвижимости, составлен план первого этажа (рисунок 2), отражающий современное расположение помещений. Согласно проведенным обмерам габариты здания в крайних осях 23×40 м. При этом ширина основной части здания составляет около 16 м, что создавало благоприятные условия для сохранения тепла в зимний период. Определенный интерес представляет планировочное решение здания, выполненное с анфиладным расположением комнат. По образцу французского салона в центральной двухэтажной части располагается овальный зал с полукруглым эркером, из окон которого открывается вид на парк и озеро. В стенах овального зала – ниши со скульптурами. В настоящее время они заложены кирпичом.

Первоначально овальный зал был непосредственно связан с гостиной-столовой через арочный проем (впоследствии также заложено кирпичной кладкой). Из зала можно было выйти в парк через дверь в центре эркера, но и ее заложили кирпичом, переоборудовав затем в окно. Стены помещений были облицованы зеркалами, полы выполнены из наборного паркета, а потолки покрыты росписью на мифологические сюжеты, и до сих пор на потолках сохранились розетки, в центре которых крепились люстры. В вестибюле при главном входе расположена Г-образная деревянная лестница, ведущая на второй этаж. По воспоминаниям местных старожилов, можно предположить, что в левом западном крыле здания располагалась хозяйственная зона, где имелся спуск в подвал, откуда можно было пройти по подземному переходу в здание кухни-официантской, расположенной в стороне от панского дома.

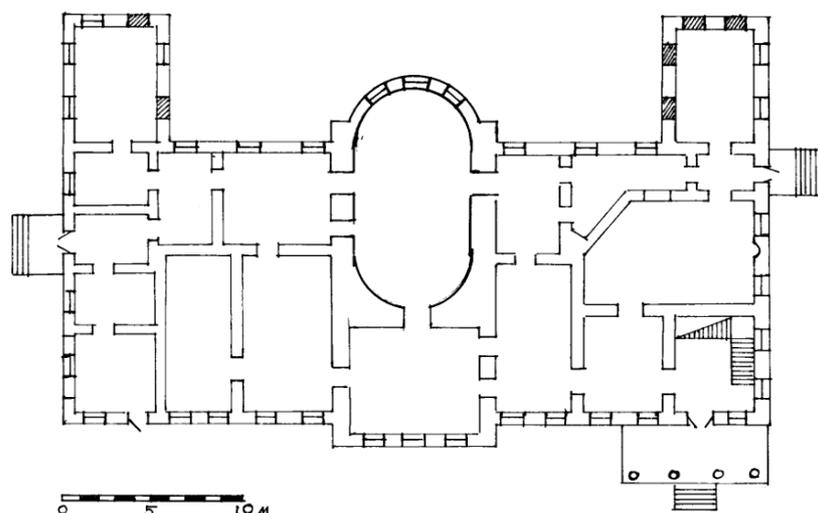


Рисунок 2. – План первого этажа

Со слов местных жителей-старожилов, первоначально в здании было дровяное отопление, но без установки печек в каждой комнате. При обследовании помещений во внутренних стенах были обнаружены проломы, сделанные кладочниками, где хорошо видны вертикальные и горизонтальные дымоотводящие каналы системы отопления, проходя через которые, горячий воздух обогревал помещения 1-го и 2-го этажей. Уже в советское время, когда в здании находилась школа, для обогрева в каждом классе были поставлены отопительные щитки, что послужило причиной пожара в 1919 году. После пожара черепичную крышу здания заменили на металлическую.

За период с 1919 года здание претерпело множество переделок: заложены кирпичом некоторые окна и дверные приемы, установлены кирпичные перегородки, пробиты новые проемы.

На современном этапе, начиная с 2008 года, здание усадьбы находится в состоянии медленного, но неминуемого разрушения. Помимо таблички, свидетельствующей о том, что это здание является памятником истории и архитектуры XIX века, закрытых досками окон и дверей, ничего кардинального с целью сохранения и восстановления данного здания сделано не было. Самым слабым местом оказалась стропильная крыша над двухэтажной центральной частью здания со стороны дворового фасада, находящаяся в стадии полного разрушения (рисунок 3, а), что привело к обрушению междуэтажного перекрытия овального зала. Постоянно увлажненные кирпичные стены в результате замораживания и оттаивания также разрушаются, как и пол 1-го этажа, который в отдельных местах находится в аварийном состоянии – его покрытие и лаги разрушились, что послужило причиной образования провалов.

Колонны входного портика и сам портик также находится в аварийном состоянии (рисунок 3, б).

По воспоминаниям старожилов, боковые входы в здание имели красиво оформленные входные портики с колоннами, а над главным входным портиком располагалась скульптурная композиция.

Таким образом, физическое состояние здания усадьбы Гребницких и виды его разрушения свидетельствуют о том, что если в ближайшее время не принять меры по его сохранению, здание будет

полностью разрушено, а это приведет к безвозвратной потере еще одного яркого свидетеля истории – памятника истории и архитектуры XIX века.



а



б

**Рисунок 3. – Разрушающиеся части здания:
эркер дворового фасада (а); портик главного входа (б)**

В 2019 году авторами представленной работы (Г. З и М. К.) проведены визуальные натурные обследования территории усадьбы для уточнения ее планировочной и функциональной структуры с фиксацией расположения зданий, дорог, аллей и самых крупных деревьев в парковой зоне. Результаты работы фиксировались в форме кроков, фотоснимков и записей воспоминаний местных старожилов. Современное состояние застройки и признаки бывшей планировочной структуры усадьбы и парка отражены в схеме генплана, составленного на основе кроков (рисунок 4).

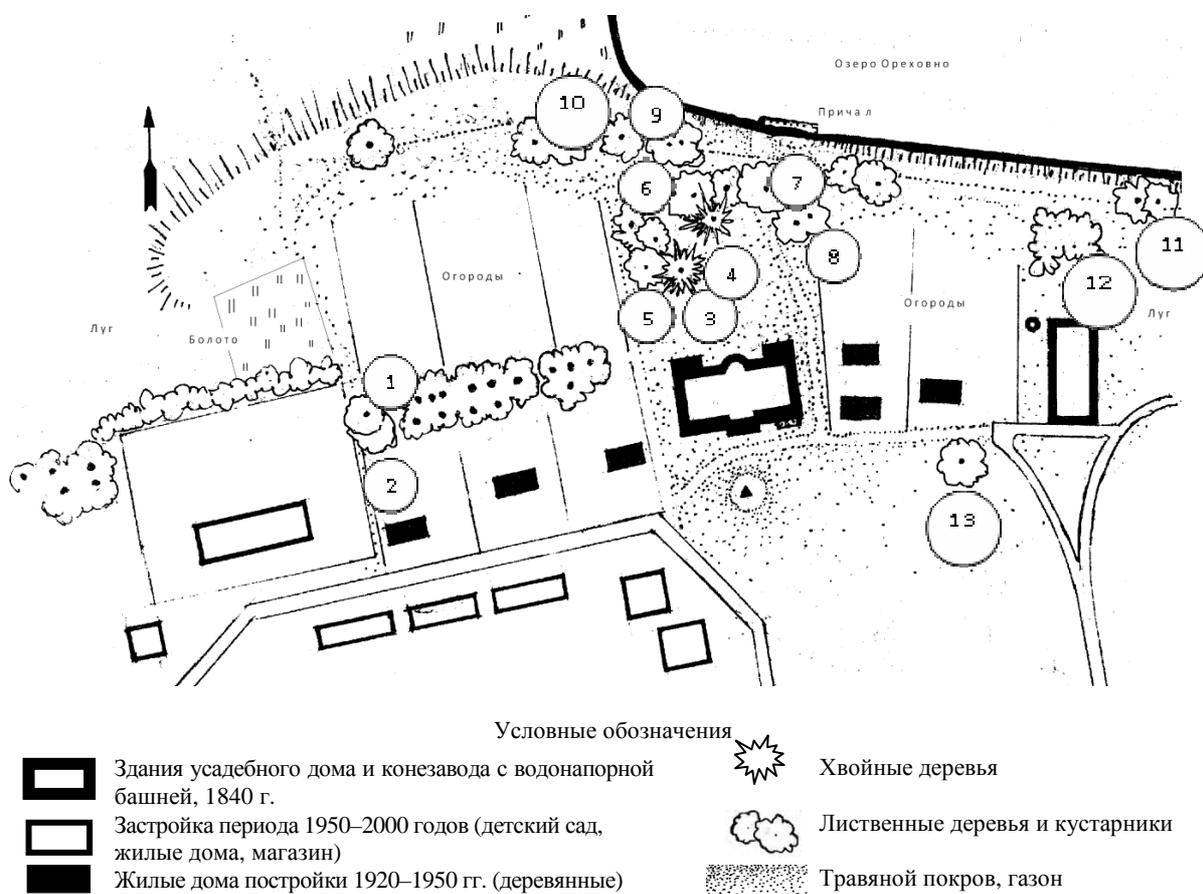


Рисунок 4. – Схема современного состояния центральной части усадьбы Гребницких

Особую ценность для будущих поколений представляют исторические насаждения, сохранившиеся в период с XVIII по XIX век.

Краткие сведения об этих растениях приведены в таблице 1 (методика систематизации растений по А.В. Колесникову) [8].

Таблица 1. – Характеристика сохранившихся древесных насаждений парка [8]

№ (см. рисунок 4)	Род	Диаметр ствола, см	Максимально возможная высота, м	Предельный возраст в условиях парка	Примечания
1	Липа мелколистная	73	30	300–400 (ед. – до 500–600)	В возрасте 110 лет имеет среднюю высоту 24 м и диаметр ствола 42 см.
2	Липа мелколистная	75			Узкопирамидальная крона, максимальный диаметр 150 см (ед. – 200 см)
3	Сосна веймутова (с. белая)	118	40 (ед. 50)	400	В 1605 году привезена в Британию из Америки мореплавателем Веймутом (W). В 90 лет имеет диаметр ствола 76 см
4	Лиственница европейская (л. опадающая)	73	30–40	400–500 (ед.– до 600)	В качестве экотипа рассматривается лиственница польская**
5	Клен*	110	*до 30	300	Уточнить форму (имеется всего 14 форм)
6	Клен остролистный	153			
7	Тополь белый (серебристый)	158	40–45	200	В возрасте 130 лет достигает высоты 40 м и диаметра ствола 140 см (170 у основания)
8	Тополь*	116	*		Самый крупный в группе
9	Тополь*	108	*		Самый крупный в группе
10	Тополь*	120	*		В структуре аллеи
11	Ива*	*	*	80–100	Род Ива имеет более 600 видов
12	Бузина черная*	*	5–10	50	Одичавшие заросли. Имеют 7 форм
13	Дуб *	135	30–40 (ед. 50)	400–500 (ед. 1000–1500)	Насчитывается около 600 видов
* Уточнить показатели, отражающие качественное состояние (возраст, высота) и род, секцию, вид, форму по дендрологическим характеристикам.					
** Саженцы в XVI–XVII вв. привозились из питомников Подзамча (Варшава), в XVIII веке их уже можно было приобрести в питомнике г. Клецка [7; 8, с. 33].					

Для более точной локализации деревьев и опорных точек всей системы парка, по нашему мнению, следует провести полноценные обмеры данного объекта ландшафтной архитектуры, так как исторические документальные свидетельства и сведения о границах, составе и планировке отсутствуют.

Графических материалов XIX – начала XX века с генпланами поместья площадью 2500 десятин (немногом больше двадцати пяти квадратных километров) и самой усадьбы пока не найдено.

С дороги Ушачи – Сорочино видны группы массивных старинных деревьев в пространстве усадебного комплекса. Эти группы, состоящие из лип одного возраста, своим расположением выявляют контуры первоначальной въездной аллеи (рисунок 5).

От центра усадьбы прямая липовая аллея шла в юго-западном направлении (на Ушачи) и примерно в 300 метрах круто поворачивала к старинному шляху. Качественное состояние старинных лип позволяет предположить, что их возраст превосходит 280 лет.

По ориентации въездной липовой аллеи мы можем только предполагать, где находился старинный деревянный «панский дом», или «дворец», в 1745 году – время покупки имения Антонием и Ядвигой Гребницкими.

По архивным источникам установлено, что в 1840 году Николаем Гребницким в Ореховно были начаты работы по строительству нового дома в стиле позднего классицизма и перепланировке парка,

в результате которых от шляха к новому дворцу была сформирована новая въездная аллея, длина которой составляла около 150 м, а ширина 8–10 м.



Рисунок 5. – Бывшая въездная липовая аллея

На территории усадьбы Гребницкие наладили производство кирпича и черепицы, создали суконную фабрику, пивоварню, конезавод, кузницу и обеспечили все постройки собственной водопроводной сетью. Водонапорная башня в конце XIX века была деревянной, затем на ее месте была возведена кирпичная, однако и она уже превратилась в руины. До нашего времени сохранились лишь здания прачечной суконной фабрики, птичника, конюшни, конезавода и кузницы (рисунок 6).



a



б

**Рисунок 6. – Сохранившиеся здания конюшни конезавода (а);
здание кузницы и руины водонапорной башни (б)**

В результате работ по обновлению центральной усадьбы в середине XIX века на берегу озера Ореховно появился запроектированный архитектором Владиславом Маркони живописный парковый ансамбль площадью около 20 гектаров, сформированный аллеями, боскетами, мраморными скульпту-

рами и цветниками. В соответствии с новыми тенденциями включал элементы старой планировки и деревья ценных пород более ранней посадки. Сохранились фрагменты прогулочной аллеи вокруг озера с тополями, ивами и сиренью (рисунок 7).



Рисунок 7. – Фрагменты прогулочной аллеи вокруг озера Ореховно

Следует отметить, что по традициям классицизма и барокко (XVII–XVIII вв.) в усадьбах на прилегающих к дому (дворцу) территориях по регулярной схеме проектировались и размещались не только рекреационные зоны, но и овощные огороды, сады из плодовых деревьев, поля с зерновыми, лекарственными и душистыми растениями [7]. Несомненно, что такие хозяйственные участки были вписаны и в первоначальную планировочную структуру парка Гребницких.

Обследования территории парка, расположенного вокруг усадебного дома, позволили на основе кроков составить схему зонирования и экспликацию сохранившихся древесных насаждений парка, фиксирующую расположение самых крупных деревьев.

Заключение. Материалы, полученные в результате обследования усадьбы Гребницких в Ореховно, могут послужить поводом и основой для начала планомерной работы по реализации идеи о ревитализации (восстановлении и адаптации) данной усадьбы. В Беларуси имеется богатый опыт работы по ревитализации исторических усадеб. Эти работы требуют определенной системности и использования разных методов, которые определяются ценностью и сохранностью исторических построек, градостроительных, ландшафтных, природных и экономических условий [9]. В первую очередь, необходимо в соответствии с требованиями административно-юридических процедур предложить администрации Витебского областного исполнительного комитета на уровне министерств принять решение о ревитализации усадьбы Гребницких и включить эту проблему в план работы Управления культуры области.

Целесообразно продолжить работы в научно-исследовательском направлении с целью поиска графических архивных материалов об усадьбе Гребницких в фондах Национального исторического архива Беларуси (НИАБ), в собрании рукописных карт в отделе рукописей библиотеки Российской академии наук в Санкт-Петербурге, в инвентарях Речи Посполитой XVI–XVIII вв., находящихся в архивах Польши, Литвы, других стран, предложить администрации Ушачского района начать совместную организационную работу по подготовке материалов к проведению общественного обсуждения темы «Ревитализация усадьбы Гребницких в агрогородке Ореховно».

В рамках подготовки к реализации предполагаемого проекта ревитализации усадьбы необходимо найти исполнителя для проведения топографической съемки существующих древесных и кустарниковых насаждений и их таксации (дендрологические характеристики, оценка качественного состояния). Эти работы могут осуществить студенты-архитекторы Полоцкого университета совместно с учащимися Полоцкого лесного колледжа во время практики или специалисты проектных организаций.

В процессе сбора и анализа материалов по объекту следует выбрать принцип восстановления и адаптации, по которому можно наиболее рационально реставрировать эту историческую усадьбу.

После проведения восстановительных работ ансамбль усадьбы будет интересен как памятник архитектуры, а объект может быть включен в республиканские туристические маршруты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзяржаўны спіс гісторыка-культурных каштоўнасцей Рэспублікі Беларусь : зацверджан пастановай Савета Міністраў Рэспублікі Беларусь 15.06.2006, № 762.
2. Кулагин, А.Н. Архитектура дворцово-усадебных ансамблей Белоруссии: Вторая половина XVIII – начало XIX в. / А.Н. Кулагин. – Минск : Наука и техника, 1981. – 134 с.
3. Федорук, А.Т. Садово-парковое искусство Белоруссии / А.А. Федорук. – Минск : Ураджай, 1989. – 247 с.
4. Захаркина, Г.И. Усадебно-парковый комплекс Гребницких в д. Ореховно Ушачского района / Г.И. Захаркина // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных районов : сб. науч. тр. по материалам конф., Новополоцк, 2018 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2018. – С. 80–83.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ореховно_\(Ушачский_район\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ореховно_(Ушачский_район)).
6. Усадьба Гребницких в воспоминаниях старожилов. – Фонд каф. «Архитектура», ПГУ, 2019.
7. Метельский, А.А. Забытая Альба : очерк истории загородной резиденции Радзивиллов под Несвижем / А.А. Метельский. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 128 с.
8. Колесников, А.И. Декоративная дендрология / А.И. Колесников. – М. : Лес. пром., 1974. – 704 с.
- 8 Власюк, Н.Н. Научно-методические основы восстановления и адаптации исторических усадеб Беларуси для культурно-туристского использования / Н.Н. Власюк, Г.А. Потаев // Вестн. БНТУ, Архитектура и строительство. – 2006. – № 2. – С. 5–10.

Поступила 16.12.2019

THE BUILDING OF THE GREBNITSKY ESTATE AND THE SURROUNDING AREA IN THE AGRO-TOWN OF OREKHOVO-USHACHSKY DISTRICT: CURRENT STATE

G. ZAKHARKINA, M. KABAeva

The modern architectural and planning state of the Grebnitsky estate in the village of Orekhovo is considered. The results of field surveys of the territory, green spaces, structures of the building and its main parts are presented. The compositional features of the facades of the building and the plan of the first floor are revealed. Brief characteristics of architectural styles in relation to garden and Park construction are given. The plan of the organization of pre-project works on restoration and adaptation of the estate is offered.

Keywords: *palace and manor complex, landscape architecture, space, environment, composition, Baroque, classicism, construction, restoration methods, dendrology.*

УДК 728.83

**АРХИТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ
УСАДЕБНОГО ДОМА А.А. РИМСКОГО-КОРСАКОВА
В ДЕРЕВНЕ БЕЗДЕДОВИЧИ ПОЛОЦКОГО РАЙОНА**

*канд. техн. наук, доц. Р.М. ПЛАТОНОВА; доц. В.Г. ЛУКЬЯНЕНКО
(Полоцкий государственный университет);
А.Т. ЗЕЛЕНКОВ
(САЛЮС, Новополоцк)*

Рассмотрено архитектурно-конструктивное решение усадебного дома А.А. Римского-Корсакова, расположенного в деревне Бездедовичи Полоцкого района. На основе архитектурно-стилистического анализа и технического обследования основных строительных конструкций усадебного дома, библиографических изысканий установлено, что здание нуждается в реконструкции и реставрации. Предложено при восстановлении усадебного дома сохранить его исторический облик, включая пейзажный парк с его водными системами во взаимосвязи с природным окружением. По окончании этих работ необходимо иметь свободный доступ к историческому комплексу как памятнику истории и культуры, использовать его познавательную ценность в туристических целях. Сделан вывод о возможности создания на его основе музея, культурно-образовательного комплекса, туристической гостиницы.

Ключевые слова: *усадебный дом, пейзажный парк, реконструкции, перекрытие, стропильная система, кровля, фундамент, стены.*

Введение. Архитектура Беларуси – истинный свидетель ее богатой истории. Несмотря на бурное прошлое, полное войн и разрушений, многие архитектурные сокровища и достопримечательности Беларуси выстояли, чтобы сохранить для потомков историю белорусского народа и государства.

В последнее время в Республике Беларусь возрос интерес к малоизвестным архитектурным памятникам XVII–XIX веков и начала XX века, расположенным в живописных уголках Беларуси. Яркими архитектурными памятниками выступают усадебные и дворцовые комплексы, имеющие большое значение в формировании неповторимого облика страны. Усадьбы Беларуси прошли сложный исторический путь как экономические и культурные центры обширных регионов и зачастую были родовыми гнездами знаменитых людей. При посещении усадеб можно познакомиться с их историей, архитектурным стилем и особым материальным и духовным миром, который складывался и передавался из поколения в поколение. Многие усадьбы Беларуси не сохранились до наших дней, но те из них, которые находятся в удовлетворительном состоянии, после проведения реконструкции и реставрации могут использоваться в туристических и других целях. Одно из таких мест на территории Беларуси – усадьба А.А. Римского-Корсакова, расположенная в деревне Бездедовичи Полоцкого района Витебской области.

Основная часть. Усадебно-парковый комплекс А.А. Римского-Корсакова, родственника известного композитора Н.А. Римского-Корсакова [1], сохранился к настоящему времени в хорошем состоянии. Комплекс создан в начале XX века, включает усадебный дом, пейзажный парк с системой прудов и хозяйственные постройки. С 2007 года комплекс усадьбы входит в Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь, о чем свидетельствует охранная доска на усадебном доме.

Центр ансамбля – двухэтажный усадебный дом, построенный в стиле неоклассицизма с элементами модерна [2; 3]. Дом расположен на невысоком холме, выстроен из камня, с мощными стенами. По словам его хозяина, «Это для того, чтобы дом сохранился в нашем роду тысячу лет» [1]. Необычный внешний вид зданию придают разновеликие ризалиты, выступающие от основного фасада. Над центральным входом ранее был надстроен балкон, который до нашего времени не сохранился. Главный и боковой фасады дома представлены на рисунке 1; южный фасад – на рисунке 2.

Александр Александрович Римский-Корсаков – известный государственный деятель царской России, действительный статский советник, член Государственного Совета – оставил о себе добрую память на Полоцкой земле [4]. В 1903 году избран Витебским губернским представителем дворянства. Был владельцем более 1000 десятин земли и 500 десятин леса, имел усадьбы Старый Двор и Бездедовичи; его супруга, дворянка Людмила Павловна Римская-Корсакова, обладала усадьбой Дубровка.

На средства А.А. Римского-Корсакова были построены церковь и школа в селе Дубровка.

Александр Александрович Римский-Корсаков был почетным опекуном Дубровского народного училища, почетным мировым судьей в Лепельском уезде. В 1911 году в новом доме в усадьбе Бездедовичи хозяева праздновали 25-летие своей свадьбы. Имение содержалось в идеальном порядке, на территории помимо жилого дома были хозяйственные постройки, дома для прислуги, конюшня. Усадебный дом и часть хозяйственных построек сохранились практически без изменений. Вокруг дома был разбит

пейзажный парк в классическом английском стиле [5]. Парк заложен с южной стороны здания. Для питания искусственных водоемов и фонтанов была создана сложная система дренажа. Однако в настоящее время пруд находится в заросшем состоянии, а парк трудно проходим из-за обилия кустарника. В усадебном доме сегодня находится больница сестринского ухода.



Рисунок 1. – Фасады усадебного дома:
а – главный; б – боковой

Для проведения реконструкции больницы «ФИРМА САЛЮС» выполнила техническое обследование строительных конструкций усадебного дома, в котором непосредственное участие в рамках Госбюджетной научно-исследовательской работы № 3316 «Проблемы и тенденции архитектуры Белорусского Подвинья» кафедры архитектуры Полоцкого государственного университета принимали авторы представляемой работы.

При проведении обследования установлено следующее: здание усадебного комплекса имеет сложную форму в плане. Конструктивная схема здания – с продольными и поперечными наружными и внутренними несущими стенами.

Общие размеры здания в плане $29,34 \times 19,12$ м (в осях). Под частью здания, в осях 4-9/А-Е, располагается подвал. Планы 1-го и 2-го этажей представлены на рисунке 3.

Высота помещений: подвала – 2,0 м; 1-го этажа – в осях А-Ж – 3,7 м; в осях Ж-И – 3,35 м; 2-го этажа – в осях А-Ж – 4,3 м; в осях Ж-И – 4,0 м.



Рисунок 2. – Южный фасад усадебного дома

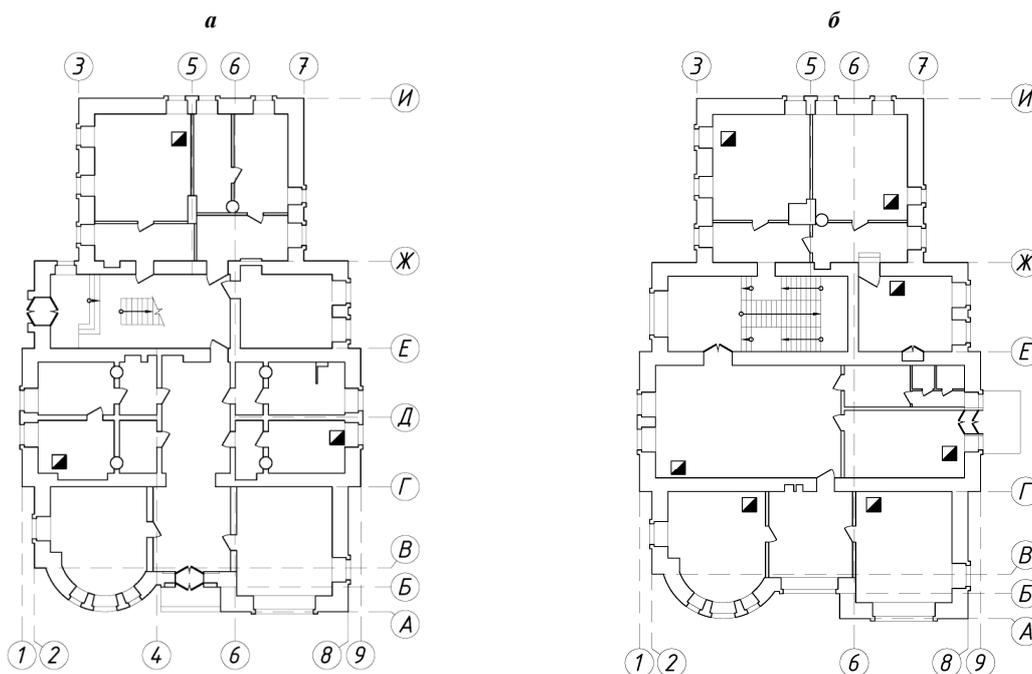


Рисунок 3. – Планы усадебного дома: 1-го этажа (а); 2-го этажа (б)

Основные конструктивные решения элементов здания:

- фундаменты – ленточные из бутового камня с кирпичным цоколем;
- стены: *наружные* – из керамического полнотелого кирпича, оштукатуренные с двух сторон (толщина стен: 1-й этаж – 900 мм; 2-й этаж – 770 мм); *внутренние несущие* – кирпичные, толщиной 510 мм и 640 мм с последующей штукатуркой с двух сторон; *перегородки* – кирпичные, толщиной 250 мм, оштукатуренные с двух сторон; деревянные, толщиной 150–180 мм, оштукатуренные с двух сторон по дранке;
- перекрытия: *над подвалом* – сводчатое, кирпичное по стальным балкам из двутавра № 30 (рисунок 4, а); *междуэтажное*: в осях А-Е, Е-Ж/6-8, Ж-И – деревянное, балочное (рисунок 4, б), в осях Е-Ж/1-6 – монолитное, железобетонное по стальным балкам из двутавра № 30, в местах расположения топочных печей дополнительно уложены стальные балки из рельсов; *чердачное перекрытие*: в осях А-Г – деревянное балочное, в осях Г-Е – деревянное балочное, в осях Е-Ж/4-9 – деревянное балочное, в осях Е-Ж/2-6 – деревянное по стальным балкам (рисунок 5, а), в осях Ж-И – деревянное балочное (рисунок 5, б).

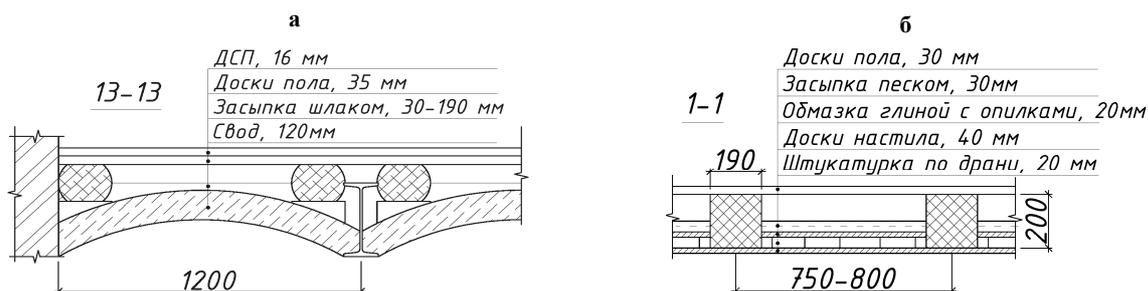


Рисунок 4. – Перекрытие: над подвалом (а); междуэтажное (б)

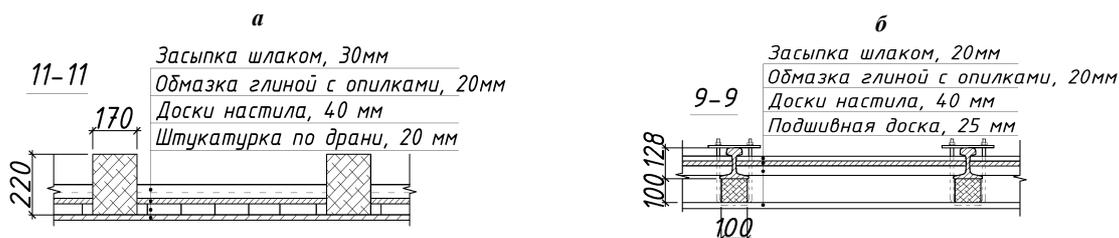


Рисунок 5. – Чердачные перекрытия по балкам: металлическим (а); деревянным (б)

Схемы перекрытий с указанием мест дефектов представлены на рисунке 6.

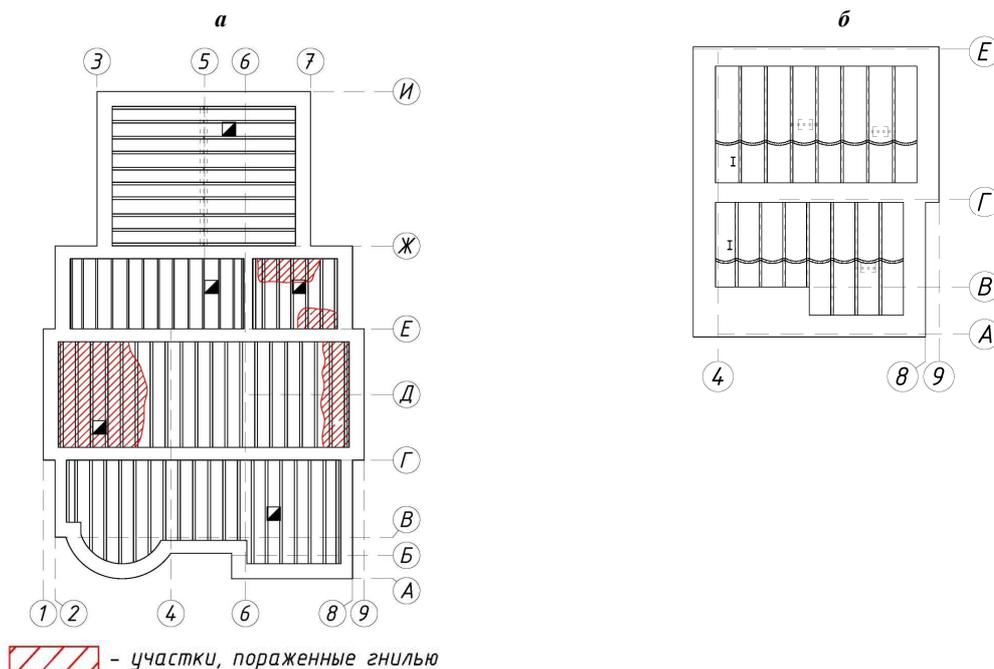


Рисунок 6. – Схемы перекрытий с указанием мест дефектов: чердачное (а); над подвалом (б)

Крыша здания – многоскатная с деревянной стропильной системой и холодным чердаком.

Схема расположения элементов стропильной системы крыши с указанием мест дефектов дана на рисунке 7. Обрешетка из бруса 50×50 мм с шагом 200–250 мм, кровля – из оцинкованной листовой стали.

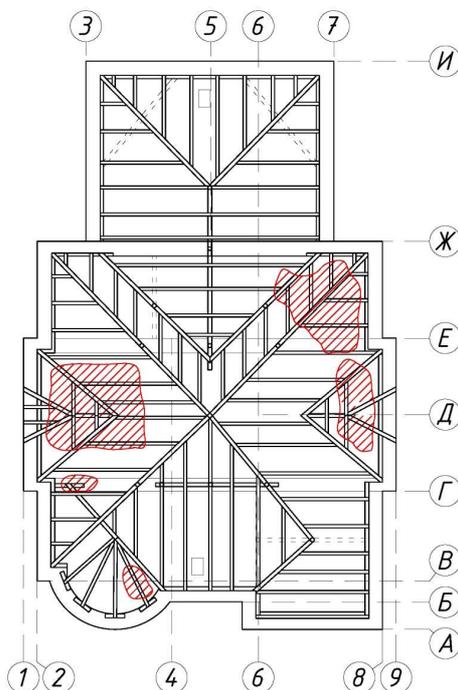


Рисунок 7. – Схема расположения элементов стропильной системы с указанием мест дефектов

Другие конструктивные элементы здания:

- *лестница*: марши – из сборных железобетонных ступеней по стальным косоурам (двутавр № 18), площадки – монолитные железобетонные по стальным балкам (двутавр № 30);
- *балкон* по оси 9 в осях Г-Е в уровне 2-го этажа – монолитный, железобетонный по стальным балкам с металлическим ограждением (рисунок 8);
- *оконные блоки* – деревянные, с двойными отдельными переплетами, дверные блоки – деревянные;
- *полы* – деревянные, дощатые по деревянным балкам с покрытием из ДСП, ДВП и линолеума, на лестничных площадках – монолитные бетонные с покрытием из линолеума.



Рисунок 8. – Балкон усадебного дома

Заключение. В результате проведенного исследования усадебного комплекса А.А. Римского-Корсакова в деревне Бездедовичи изучено архитектурно-планировочное и конструктивное решение усадебного дома.

Техническое обследование показало, что такие конструкции, как фундаменты, наружные и внутренние несущие стены, лестница, находятся в удовлетворительном состоянии, но для конструкций пере-

крытия (над подвалом, междуэтажного и чердачного) и стропильной системы с кровлей, оконных и дверных блоков, полов требуется капитальный ремонт с последующей их заменой или усилением.

При проведении восстановительных работ рассматриваемого усадебно-паркового комплекса необходимо максимально сохранить исторический облик усадьбы: здания и сооружения, парковые композиции, водные системы – во взаимосвязи с природным окружением [6].

По окончании этих работ необходимо иметь возможность свободного доступа к историческому комплексу как памятнику истории и культуры, использовать его познавательную ценность в туристических целях. На его основе может быть создан музей, культурно-образовательный комплекс, туристическая гостиница.

ЛИТЕРАТУРА

1. Платонова, Р.М. Усадьба А.А. Римского-Корсакова в Полоцком районе / Р.М. Платонова, М.А. Платонова // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Прикладные науки. Строительство. – № 12. – 2012. – С. 10–14.
2. Архітэктурна Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце : у 4 т. / А.І. Лакотка [і інш.] ; навук. рэд. А.І. Лакотка. – Мінск : Беларус. навука, 2007. – Т. 3, кн. 2 : Другая палова XIX – пачатак XIX ст. – С. 422–423.
3. Платонова, Р.М. Архитектура исторических усадеб Полоцкого района [Электронный ресурс] / Р.М. Платонова // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. ; Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. А.А. Бакатовича, Л.М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – С. 33–38.
4. Стогов, Д.И. Он заслужил большую популярность среди монархистов. Александр Александрович Римский-Корсаков (1849–1922) // Воинство святого Георгия : жизнеописания русских монархистов начала XX века / сост. и ред. А.Д. Степанов, А.А. Иванов. – СПб., 2006. – 215 с.
5. Гарнизоненко, Т.С. Справочник современного ландшафтного дизайнера / Т.С. Гарнизоненко. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – 313 с.
6. Потаев, Г. Ревитализация исторических усадеб как культурно-туристских объектов [Электронный ресурс] / Г. Потаев, Н. Власюк. – Режим доступа: <http://ais.by/story>. – Дата доступа: 25.10.2015.

Поступила 16.12.2019

ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTIVE SOLUTION OF THE MANOR HOUSE OF A.A. RIMSKY-KORSAKOV IN THE VILLAGE OF BEZDEDOVICH I, POLOTSK DISTRICT

R. PLATONOVA, V. LUKYANENKO, A. ZELENKOV

The architectural and constructive solution of the manor house of A.A. Rimsky-Korsakov, located in the village of Bezdedovich i, Polotsk district, is considered. On the basis of architectural and stylistic analysis and technical examination of the main building structures of the manor house; bibliographic research, the authors of the article found that it needs reconstruction and restoration. It is proposed to preserve its historical appearance during the restoration of the manor house, including the landscape Park with its water systems in conjunction with the natural environment. Upon completion of these works, it is necessary to have free access to the historical complex as a monument of history and culture, to use its cognitive value for tourist purposes. On its basis, a Museum, cultural and educational complex, tourist hotel can be created.

Keywords: manor house, landscape park, structures, ceiling, truss system, roof, foundation, walls.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691.175.5.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЛАЖНЫХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН**(Государственная высшая школа им. Я. Павла II в Бялой Подляске, Польша);**канд. техн. наук, доц. В.А. КОФАНОВ**(Брестский государственный технический университет);**канд. техн. наук Б. БАЦКЕЛЬ-БЖОЗОВСКА**(Белостокский политехнический институт, Польша)*

Представлена геометрическая модель структуры пенопласта с учетом влагосодержания и смачивания поверхности пор. Выполнено математическое описание процесса переноса тепла в трехкомпонентной модельной структуре влажного пенопласта с учетом диффузии пара в поровом пространстве. Предложен метод расчета эффективной теплопроводности влагосодержащих высокопористых газонаполненных полимерных материалов, в котором рассматривается модель влажного материала с твердым скелетом, более точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара, определены условия перехода от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному без необходимости определения эмпирических коэффициентов. Проведен вычислительный эксперимент, результаты которого показывают взаимное влияние влагосодержания, пористости и концентрации полимера на эффективную теплопроводность материала при заданной температуре.

Ключевые слова: *структура материала, влажный пенопласт, эффективная теплопроводность, диффузия пара, пористость, влагосодержание, математическая модель.*

Введение. Газонаполненные полимерные материалы (пенопласты) широко применяются в строительстве и других отраслях промышленности в качестве эффективной тепловой изоляции зданий и сооружений, в процессе эксплуатации которых происходит циклическое изменение температуры и влажности окружающей среды, вызывающее гигротермическую деградацию полимерной основы теплоизоляционного слоя. При этом влагосодержание материала может повышаться до значений, значительно превышающих максимальное гигроскопическое, что приводит к снижению его теплоизоляционных свойств.

Важнейшей характеристикой газонаполненных полимерных материалов, определяющей их теплозащитные свойства, является эффективный коэффициент теплопроводности λ , значение которого можно определить экспериментально или путем расчетов на основе математических моделей, описывающих структуру пористого материала и протекающие в нем совместные процессы тепло- и влагопереноса.

Из анализа работ [1–4] следует, что надежная экспериментальная оценка теплопроводности влажных пористых материалов весьма затруднительна, так как измеренная теплопроводность одного и того же материала с одним и тем же средним влагосодержанием может значительно отличаться (иногда в несколько раз). В первую очередь, это можно объяснить характером смачивания поверхности пор жидкостью (частичное или полное), характером распределения влаги в объеме испытываемого образца (равномерное или неравномерное), методом измерения (стационарный или нестационарный) и т.д. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований в работе [1] делается вывод, согласно которому все попытки учесть влияние процессов влагообмена в теплоизоляционных конструкциях на их теплозащитные свойства путем применения в расчетах эффективной теплопроводности, определяемой путем измерения теплопроводности влажных материалов стационарными и нестационарными методами, не могут дать удовлетворительных результатов. Поэтому для определения теплопроводности влажных материалов необходимо использовать и развивать инженерные методы расчета, основанные на математическом моделировании совместных процессов тепло- и влагопереноса.

Для расчета теплопроводности сухих теплоизоляционных материалов существуют многочисленные зависимости, полученные различными методами за последние более чем сто лет. В работах [5; 6] рассмотрены и проанализированы многие из них и выбраны лучшие с точки зрения точности предсказания опытных данных. Этого нельзя сказать в отношении немногочисленных публикаций [1; 2; 7], в которых для расчета эффективной теплопроводности влажного материала используется метод Кришера или его усовершенствования. Эти методы содержат эмпирические коэффициенты и при их использовании получают существенно разные результаты. При оценке влияния диффузии пара на перенос тепла не учитывается или недостаточно точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара.

Только в одной работе [1] рассматриваются влажные пенопласты и только в работе [2] учитывается характер смачивания поверхности пор жидкостью (частичное или полное). Отметим, что в открытой ячеистой структуре переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию сопровождается скачкообразным повышением эффективной теплопроводности материала. В данной работе предлагается метод расчета эффективной теплопроводности влагосодержащих высокопористых ($P > 0,85$) газонаполненных полимерных материалов, в котором рассматривается модель влажного материала с твердым скелетом, представленная в [2], более точно учитывается сопротивление пористой среды диффузии пара, определены условия перехода от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному без необходимости определения эмпирических коэффициентов.

Модель структуры влажного пенопласта и расчетные зависимости

Из результатов визуализации структур газонаполненных полимеров различных видов, представленных в ряде работ [1; 8–10], следует, что жесткий полимерный каркас состоит из многогранных ячеек открытого и закрытого типа, грани которых имеют, в основном, четырех-, пяти- и шестиугольную форму. Основная доля полимера сосредоточена преимущественно в прямолинейных стержнях, имеющих почти постоянное поперечное сечение с незначительными утолщениями к узлам, которые образованы в результате слияния, как правило, четырех стержней.

В зависимости от вида полимера и технологии его вспенивания содержание открытых ячеек изменяется в широком диапазоне и может достигать 98% [1]. В результате гигротермической деградации полимерной основы эксплуатируемых пеноматериалов происходит сокращение количества закрытых ячеек [6]. Это позволяет принять, что структура эксплуатируемых пенопластов имеет преимущественно сообщающиеся ячейки и ее следует отнести к структурам с взаимопроницающими геометрически равноправными компонентами.

Из анализа результатов работ [11; 12], полученных путем численного моделирования, следует, что для сухих высокопористых полимерных пен ($P > 0,9$) форма ячеек и поперечного сечения стержней имеют слабое влияние на теплопроводность этих материалов. При этом рассматривались ячейки регулярной структуры в виде куба, додекаэдра (12 пятиугольных граней) и тетракайдекаэдра (многогранник Кельвина, имеющий 6 квадратных и 8 шестиугольных граней). Форма узлов (квадрат, шар и др.), распределение объема полимера между стержнями и узлами реальных ячеек также не оказывают существенного влияния на теплопроводность высокопористых пенопластов. Таким образом, при расчетах теплопроводности сухих высокопористых пенопластов реальная структура материала, который считается изотропным, может быть заменена моделью с упорядоченной структурой, состоящей из одинаковых элементарных ячеек наиболее простой кубической формы.

Симметрия элементарной ячейки в двух взаимноперпендикулярных направлениях позволяет проводить описание моделируемого процесса в $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ ее части. На рисунке 1 изображена восьмая часть элементарной ячейки (кусочно-составного тела).

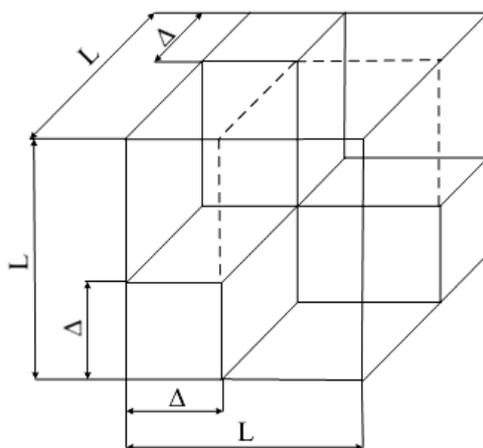


Рисунок 1. – Восьмая часть элементарной ячейки

При оценке характера распределения жидкой влаги в элементарной ячейке необходимо учитывать влагосодержание материала ψ и краевого угол смачивания θ , образованный на границе твердого тела, жидкости и газа. Из анализа результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных и натуральных условиях и частично представленных в работах [1; 13], следует, что при постоянном контакте со средой с изменяющейся влажностью и температурой объемное влагосодержание полиуретановых и фенольных пенопластов может составлять $\psi = 0,06 \dots 0,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а в отдельных случаях (изоляция на грунте, низкотемпературная изоляция) достигать значения $\psi = 0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Чтобы получить представление о значении краевого угла смачивания θ , был выполнен эксперимент с использованием метода крупной капли жидкости ($2...3 \text{ см}^3$), смачивающей горизонтальную поверхность твердого полимера [14]. После пяти независимых измерений угла смачивания водой горизонтальной поверхности твердого полиуретана при температуре 20°C оказалось, что измеряемая случайная величина характеризуется средним арифметическим значением $\bar{\theta} = 56^\circ$ и выборочным стандартным отклонением $s = 3,2^\circ$. Очевидно, что для другого типа полимера и других условий опыта значения $\bar{\theta}$ и s будут отличаться.

Достаточно просто представить характер распределения жидкости в узле элементарной ячейки. В качестве примера на рисунке 2 приведена восьмая часть элементарной ячейки, содержащей изолированное включение жидкости при угле смачивания $\theta = 45^\circ$. С увеличением влагосодержания размер x (рисунок 2) будет возрастать и при $x = L - \Delta$ поверхность стержней ячейки будет полностью смочена жидкостью. Переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию сопровождается скачкообразным возрастанием теплопроводности материала. В связи с этим важно знать граничное влагосодержание пор ψ'_p , при котором происходит данный переход.

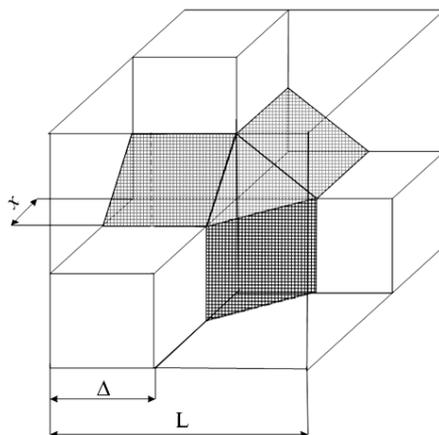


Рисунок 2. – Характер распределения изолированного включения жидкости в элементарной ячейке при угле смачивания $\theta = 45^\circ$

Объемное влагосодержание пор ψ_p связано с объемом жидкости V_w и пор V_p или с объемным влагосодержанием материала ψ и его пористостью P соотношением $\psi_p = \psi / P$.

Из рисунка 3 следует, что $V_w = 3 \cdot x^2 \cdot \Delta / 2 + x^3 / 6$.

Объем пор в сухом состоянии $V_p = (L - \Delta)^2 \cdot L + (L - \Delta)^2 \cdot \Delta \cdot 2 = L^3 - 3 \cdot \Delta^2 \cdot L + 2 \cdot \Delta^3$.

Приняв $x = L - \Delta$, после простых преобразований получим объемное граничное влагосодержание пор при угле смачивания $\theta = 45^\circ$:

$$\psi'_p = \frac{1 + 8 \cdot c}{6 \cdot (1 + 2 \cdot c)}, \quad (1)$$

где $c = \Delta / L$.

Аналогичным образом при угле смачивания $\theta = 90^\circ$ приходим к следующей зависимости:

$$\psi'_p = \frac{\pi \cdot (1 + 3,5 \cdot c)}{6 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (2)$$

При угле смачивания $\theta = 0^\circ$ имеем

$$\psi'_p = \frac{(4 - \pi) \cdot (1 + 14 \cdot c)}{20 \cdot (1 + 2 \cdot c)}. \quad (3)$$

Относительный размер стержней c вычисляется по формуле из [14]:

$$c = 0,5 + \sin \left[\frac{\arcsin(2 \cdot m_i - 1)}{3} \right], \quad (4)$$

где m_i – концентрация i -той компоненты, для которой определяется величина c (в данном случае концентрация полимера).

С помощью формул (1), (2) и (3) можно установить зависимость граничного влагосодержания пор ψ'_p от угла смачивания θ при различных значениях относительного размера стержней $c = \Delta/L$. Иллюстрация указанной зависимости представлена на рисунке 3. Из анализа этого рисунка следует, что для высокопористых пенопластов полное смачивание возможно лишь при очень малых углах смачивания и высоком влагосодержании. Поэтому в сомнительных случаях нужно выполнять проверочные расчеты.

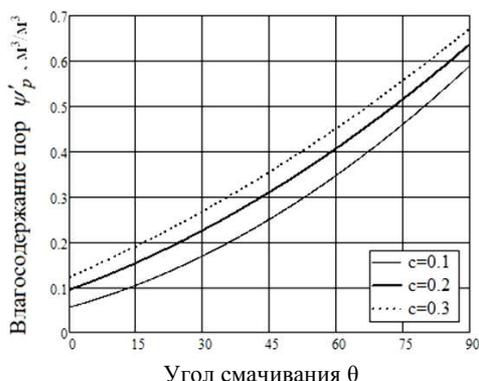


Рисунок 3. – Расчетная зависимость граничного влагосодержания пор ψ'_p от угла смачивания θ при различных относительных размерах стержней элементарной ячейки c

Очевидно, что коэффициент теплопроводности влажного пенопласта зависит от теплопроводности полимерного скелета и внутрипорового вещества, которое во влагосодержащих материалах состоит из парогазовой смеси и воды. При частичном смачивании элементарная ячейка (геометрическая модель) этой трехкомпонентной системы показана на рисунке 4. В соответствии с подходом Релея [2] эта ячейка разбита на части бесконечно тонкими плоскостями, параллельными потоку тепла G и непроницаемыми для линий тока. В результате объем элементарной ячейки оказался разбитым на 14 частей в виде прямоугольных параллелепипедов, которые имеют номера от 1 до 9. Геометрически одинаковые части (элементы) имеют одинаковые номера. Объем первой компоненты (полимера) s складывается из объема пяти элементов под номерами 1, 2 и 8. Объем второй компоненты (парогазовая смесь) складывается из шести частей под номерами 3, 4, 6 и 9, имеющих теплопроводность λ_2 . Третья компонента (жидкость) состоит из трех частей под номерами 5 и 7 с теплопроводностью λ_3 .

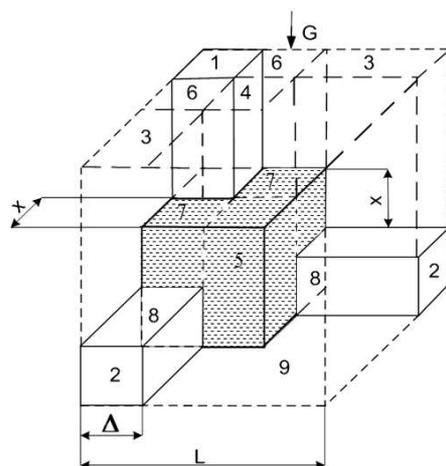


Рисунок 4. – Элементарная ячейка структуры трехкомпонентной системы

Сопротивления элементов потоку тепла вычисляется по простой формуле

$$R_i = \frac{l_i}{\lambda_i \cdot S_i}, \quad (5)$$

где l_i – длина линии тока i -го элемента; S_i – площадь поперечного сечения i -го элемента; λ_i – теплопроводность i -го элемента.

Согласно формуле (5) тепловые сопротивления элементов с номерами от 1 до 9 равны:

$$R_1 = \frac{L}{\lambda_1 \cdot \Delta^2}; R_2 = \frac{\Delta}{\lambda_1 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta - x)}; R_3 = \frac{L - \Delta}{\lambda_2 \cdot \Delta \cdot (L - \Delta - x)}; R_4 = \frac{L - \Delta - x}{\lambda_2 \cdot x^2};$$

$$R_5 = \frac{\Delta + x}{\lambda_3 \cdot x^2}; R_6 = \frac{L - \Delta - x}{\lambda_2 \cdot \Delta \cdot x}; R_7 = \frac{x}{\lambda_3 \cdot \Delta \cdot x}; R_8 = \frac{\Delta}{\lambda_1 \cdot \Delta \cdot x}; R_9 = \frac{L}{\lambda_2 \cdot [(L - \Delta)^2 - x^2]}.$$
 (6)

Значение x связано с объемом жидкости $V_{жс}$, который, как видно из рисунка 4, равен $V_{жс} = x^3 + 3 \cdot \Delta \cdot x^2$. Разделив левую и правую части этого соотношения на объем элементарной ячейки L^3 , получим кубическое уравнение вида

$$\psi = d^3 + 3 \cdot c \cdot d^2,$$
 (7)

решая которое определяем физически оправданный корень $d = x/L$ при $c = \Delta/L$.

Схема соединения сопротивлений элементов элементарной ячейки приведена на рисунке 5.

Из этой схемы определяется общее сопротивление элементарной ячейки R :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2 + R_3} + \frac{2}{R_6 + R_7 + R_8} + \frac{1}{R_4 + R_5} + \frac{1}{R_9}.$$
 (8)

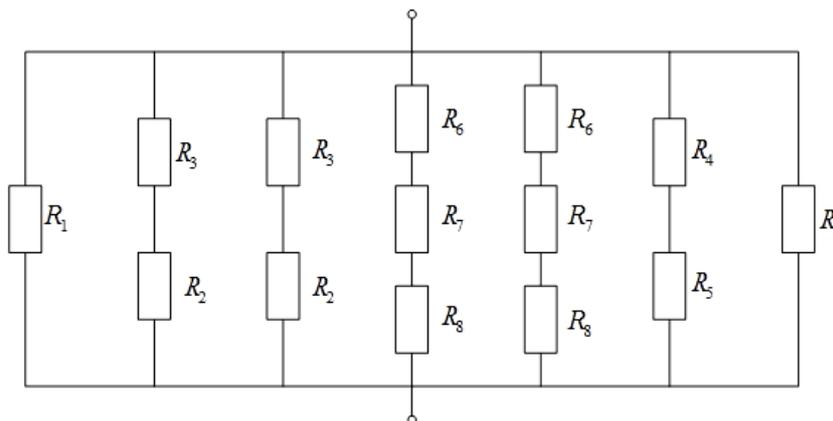


Рисунок 5. – Схема соединения сопротивлений элементов элементарной ячейки

Общее сопротивление элементарной ячейки объема L^3 , заполненной однородным веществом с эффективной теплопроводностью λ , может быть представлено следующим образом:

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot L^2} = \frac{1}{\lambda \cdot L}.$$
 (9)

Переписав формулу (8) с учетом (6) и (9), после несложных преобразований получим довольно громоздкую зависимость для определения эффективной теплопроводности трехкомпонентной системы:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = c^2 + \frac{2 \cdot v_1 \cdot c \cdot (1 - c - d)}{v_1 \cdot c + 1 - c} + \frac{2 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot c \cdot d}{v_2 \cdot (1 - c - d) + v_1 \cdot d + v_1 \cdot v_2 \cdot c} +$$

$$+ \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot d^2}{v_2 \cdot (1 - c - d) + v_1 \cdot (c + d)} + v_1 \cdot [(1 - c)^2 - d^2],$$
 (10)

где $v_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$, $v_2 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}$, $c = \frac{\Delta}{L}$, $d = \frac{x}{L}$.

Эффективную теплопроводность трехкомпонентной системы можно определить также методом последовательного сведения многокомпонентной системы к бинарной, теплопроводность которой вычисляется по известным формулам [2]. Такой подход возможен лишь при условии, что его использование приводит к результату, получаемому по формуле (10). После численного эксперимента оказалось, что условие равенства результатов выполняется, если последовательно рассматриваются две бинарные

системы. На первом этапе определяется эффективная теплопроводность внутрипорового вещества, содержащего парогазовую смесь (индекс компоненты 2) и жидкость (индекс 3). На втором этапе определяется эффективная теплопроводность всего материала (комбинация индексов 23 и 1). При остальных двух комбинациях индексов компонентов (12 и 3; 13 и 2) получаются результаты, существенно отличающиеся от результатов, определяемых по формуле (10).

Таким образом, имеется возможность определить эффективную теплопроводность рассматриваемой трехкомпонентной системы с использованием известных простых формул, полученных для бинарных систем. Для этого вначале определялась теплопроводность парогазовой смеси λ_{va} путем суммирования теплопроводности газа (воздуха) λ_a и теплопроводности за счет диффузии водяного пара в поровом пространстве λ_v . Затем вычислялась эффективная теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} , состоящего из парогазовой смеси и жидкости с известными концентрациями и теплопроводностями.

Если поверхность пор (ячеек) смачивается жидкостью частично, то теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} определяется с использованием зависимости для структуры с замкнутыми включениями [2]:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{v - (v-1) \cdot (1 - m_2^{2/3}) \cdot m_2^{1/3}}{v - (v-1) \cdot m_2^{1/3}}, \quad (11)$$

где $\lambda = \lambda_{subp}$; $\lambda_1 = \lambda_{va}$; $v = \lambda_2/\lambda_1$; λ_2 – теплопроводность жидкости; m_2 – концентрация включений (жидкости).

Если поверхность пор смачивается полностью, то для определения λ_{subp} используется зависимость для структуры с взаимопроникающими компонентами [2]:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \left[c^2 + v \cdot (1-c)^2 + 2 \cdot v \cdot c \cdot (1-c) \cdot (v \cdot c + 1 - c)^{-1} \right], \quad (12)$$

где $\lambda = \lambda_{subp}$; $\lambda_1 = \lambda_{va}$; $v = \lambda_2/\lambda_1$.

И наконец, по формуле (12) при теплопроводности полимера λ_1 и теплопроводности внутрипорового вещества $\lambda_2 = \lambda_{subp}$, а также их соотношении $v = \lambda_2/\lambda_1$ вычисляется эффективная теплопроводность всего материала λ .

Теплопроводность пара λ_v , вызванная его диффузионным переносом в поровом пространстве, определяется по формуле [2], базирующейся на зависимости Кришера [7]:

$$\lambda_v = \frac{D}{\mu} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \frac{p_{va}}{p_{va} - p_v} \cdot \frac{dp_v}{dt} \cdot q_t. \quad (13)$$

Здесь D – коэффициент диффузии водяного пара в неподвижном воздухе, m^2/c ; μ – коэффициент сопротивления диффузии пара через поровое пространство; M – молекулярная масса пара, kg/mol ; R – универсальная газовая постоянная, $Dж/(моль \cdot K)$; T – температура пара, K ; p_{va} – суммарное давление пара и воздуха, Pa ; p_v – парциальное давление насыщенного пара, Pa ; t – температура, $^{\circ}C$; q_t – удельная теплота парообразования при температуре t , $Dж/kg$.

При определении коэффициента диффузии пара D воспользуемся широко известной формулой Схимера (R. Schirmer) [7; 15]:

$$D = \frac{2,305 \cdot 10^{-5} \cdot p_0}{p_{va}} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}, \quad (14)$$

где $p_0 = 101323 Pa$.

Коэффициент сопротивления диффузии пара целесообразно определять с помощью зависимости, полученной на основе работ [16; 17]:

$$\mu = \frac{\tau^2}{P - \Psi}, \quad (15)$$

где τ – коэффициент извилистости, который согласно [14] равен

$$\tau = \frac{P - \Psi}{c^2}. \quad (16)$$

После подстановки формулы (16) в (15) получаем:

$$\mu = \frac{P - \Psi}{c^4}. \quad (17)$$

Производную dp_v/dt можно определить с помощью справочных данных или по формуле из [7]:

$$\frac{dp_v}{dt} = \frac{2,44314 \cdot 10^6}{(234,175 + t)^2} \cdot \exp\left(\frac{17,08085 \cdot t}{234,175 + t}\right). \quad (18)$$

Температурная зависимость удельной теплоты парообразования имеет вид:

$$q_t = (2,5 - 0,0024 \cdot t) \cdot 10^6. \quad (19)$$

Теплопроводность воды можно определить как

$$\lambda_w = 0,551 + 0,256 \cdot 10^{-2} \cdot t - 0,124 \cdot 10^{-4} \cdot t^2. \quad (20)$$

Для определения теплопроводности воздуха воспользуемся зависимостью [1]:

$$\lambda_a = 0,0257 \cdot [1 + 0,003 \cdot (t - 20)]. \quad (21)$$

В температурном диапазоне от 0 до 100 °С теплопроводность полимерного скелета изменяется незначительно [1] и может быть принята постоянной.

Отметим, что сорбционная влажность материала отдельно не учитывалась и включалась в общее влагосодержание ψ , так как максимальная гигроскопическая влажность ψ_h большинства пенопластов составляет лишь 0,001–0,006 м³/м³ и повышает теплопроводность внутрипорового вещества λ_{subp} не более чем на 1,5%.

Вычислительный эксперимент и его результаты

Вычислительный эксперимент выполнен с целью оценки влияния влагосодержания ψ и пористости P пенопласта на его эффективную теплопроводность λ при заданной температуре. Температура пенопласта t принята равной 20 °С. При этом теплопроводность полимера принята равной 0,25 Вт/(м·К), что типично для полиуретанов. Теплопроводность воды составляла 0,597 Вт/(м·К), воздуха – 0,0257 Вт/(м·К). Удельная теплота парообразования при $t = 20$ °С равнялась $q = 2,452 \cdot 10^6$ Дж/кг. Остальные необходимые для выполнения вычислительного эксперимента параметры определялись с помощью приведенных выше формул. Влагосодержание варьировалось от 0,01 до 0,20 м³/м³, пористость P – от 0,85 до 0,99. В таком случае активная пористость $P - \psi$ изменялась от 0,98 до 0,65, а суммарная объемная концентрация твердой и жидкой компонент $1 - (P - \psi)$ изменялась от 0,02 до 0,35. Для сравнения был выполнен расчет при отсутствии жидкости ($\psi = 0$), который позволил выявить влияние диффузии пара и влагосодержания на теплопроводность высокопористых материалов.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 6 совместно с опытными данными, взятыми из работы [1] и отмеченными треугольниками. Эти результаты отражают взаимное влияние влагосодержания ψ , пористости P и диффузии пара внутри эффективной пористости $P - \psi$ на эффективную теплопроводность материала λ .

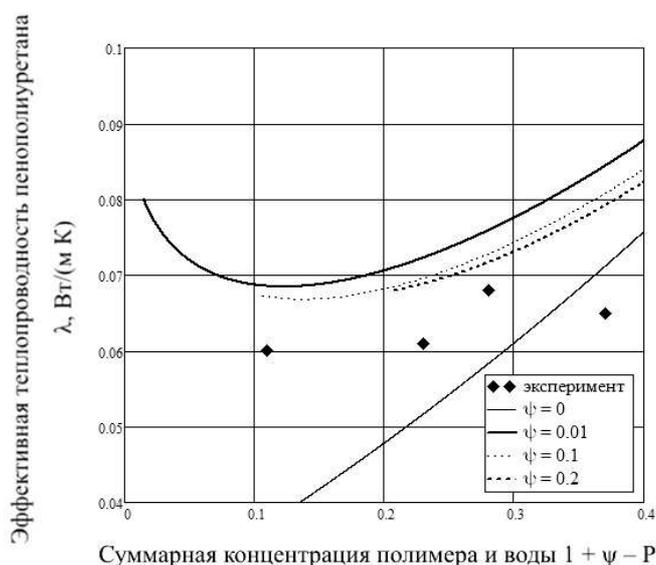


Рисунок 6. – Зависимость эффективной теплопроводности пенополиуретана λ от суммарной концентрации полимера и воды ($1 + \psi - P$)

Из рисунка 6 видно, что все зависимости (кривые), полученные при фиксированных значениях реального влагосодержания ($\psi \leq 0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$), характеризуются криволинейностью. Эта криволинейность связана с тем, что с увеличением доли твердого полимера и жидкости возрастает теплопроводность материала и уменьшается его эффективная пористость и, следовательно, уменьшается теплопроводность материала за счет диффузии пара. Заметим, что все эти кривые могут быть с достаточной точностью аппроксимированы одной зависимостью, которая качественно совпадает с эмпирическими зависимостями эффективной теплопроводности различных сухих теплоизоляционных материалов от их плотности, полученными различными авторами [1; 18].

Предлагаемый метод расчета неплохо (в пределах двух стандартных отклонений) предсказывает опытные данные, отображенные на рисунке 6 и обозначенные треугольниками. Эти опытные данные получены для фенольного пенопласта. Как известно, теплопроводность твердого фенольного полимера меньше полиуретанового и составляет примерно $0,19 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Если в вычислениях использовать это значение, то расчетные кривые, приведенные на рисунке 6, опустятся ниже, а опытные данные, обозначенные треугольниками, будут предсказываться более точно.

И наконец, расчетами был подтвержден общеизвестный эффект повышения теплопроводности влажного пенопласта с повышением его средней температуры. При этом влияние диффузионного потока водяного пара на теплопроводность материала существенно возрастает.

Заключение

В ходе проведенного исследования теплопроводности влажных газонаполненных полимерных материалов реализованы следующие задачи:

- обоснована геометрическая модель структуры пенопласта с учетом влагосодержания и смачивания поверхности пор;
- получены зависимости, позволяющие определить критическое влагосодержание пор, при котором происходит переход от частичного смачивания поверхности пор жидкостью к полному смачиванию и наоборот;
- выполнено математическое описание процесса переноса тепла в трехкомпонентной модельной структуре влажного пенопласта с учетом диффузии пара в поровом пространстве;
- установлено взаимное влияние влагосодержания ψ , пористости P и концентрации полимера $(1 - P)$ на теплопроводность материала путем вычислительного эксперимента при заданной температуре;
- выполнено сравнение результатов расчета с опытными данными, показано их достаточно точное совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев, В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов. – М. : Стройиздат, 2003. – 416 с.
2. Дульнев, Г.Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г.Н. Дульнев, В.В. Новиков. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
3. Bobociński, A. Wpływ wilgotności ponadsorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komorkowych / A. Bobociński // Prace Instytutu Techniki Budowlanej-Kwartalnik. – 2004. – Nr. 4. – S. 3–12.
4. Siwińska, A. Thermal conductivity coefficient of cement-based mortars as air relative humidity function / A. Siwińska, H. Garbalińska // Heat Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47. – S. 1077–1087.
5. Collishaw, P.G. An assessment of expressions for the apartment thermal conductivity of cellular materials / P.G. Collishaw, J.R.G. Evans // Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29. – P. 486–498.
6. Гурьев, В.В. Учет особенностей ячеистой структуры при анализе расчетной теплопроводности газонаполненных полимерных материалов / В.В. Гурьев, В.И. Никитин, В.А. Кофанов // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 98–104.
7. Ochs, F. Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature / F. Ochs, W. Heidemann, H. Müller-Steinhagen // Heat Mass Transfer. – 2008. – № 51. – P. 539–552.
8. Shi, M. Determination of effective thermal conductivity for polyurethane foam by use of fractal method / M. Shi, X. Li, Y. Chen // Science in China. Series E: Technological Sciences. – 2006. – Vol. 49, № 4. – P. 468–475.
9. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Lagguare-Voronoi tessellation method / J. Randrianalisoa [et al.] // Heat Mass Transfer. – 2015. – № 98. – P. 277–286.
10. Baillis, D. Effective conductivity of Voronoi's closed and open-cell foams: analytical laws and numerical results / D. Baillis, R. Coquard, S. Cunsolo // Materials Science. – 2017. – № 52. – P. 11146–11167.

11. Gliksman, L.R. Heat transfer in foams / L.R. Gliksman, N.C. Hilyard ; A. Cumingham (eds.) // Low density cellular plastics Springer. – Dordrecht, 1994. – P. 104–152.
12. Coquard, R. Numerical investigation of conductive heat transfer in high porosity foams / R. Coquard, D. Baillis // Acta Materialia. – 2009. – № 57. – P. 5466–5479.
13. Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/DIR) : Report № 1 (October) / BING : Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations. – Brussels, 2006. – 33 p.
14. Nikitsin, V.I. Determination of capillary tortuosity coefficient in calculations of moisture transfer in building materials / V.I. Nikitsin, B. Backiel-Brzozowska // Heat Mass Transfer. – 2013. – № 56. – P. 30–34.
15. Sheffer, G.A. A whole range hygric material model : Modelling liquid and vapour transport properties in porous media / G.A. Sheffer // Heat Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53. – P. 286–296.
16. Epstein, N. On tortuosity and the tortuosity factor in flow and diffusion through porous media / N. Epstein // Chemical Engineering Science. – 1989. – Vol. 44, № 3. – P. 777–779.
17. Mendes, M. An improved model for the effective conductivity of open-cell porous foams / M. Mendes, S. Ray, D. Trimis // Heat Mass Transfer. – 2014. – Vol. 75. – P. 224–230.
18. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / F. Dominguez-Munoz [et al.] // Building Simulation : materials of XI International IBPSA Conference, Glasgow, 27–30 July 2009. – Glasgow, 2009. – P. 1008–1013.

Посмунна 02.12.2019

DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF WET GAS-FILLED POLYMERIC MATERIALS

V. NIKITSIN, V. KOFANOV, B. BACKIEL-BRZOZOWSKA

A geometric model of the structure of the foam plastic is presented taking into account the moisture content and wetting of the pore surface. A mathematical description of the heat transfer process in a three-component model structure of wet foam is performed taking into account vapor diffusion in the pore space. A method for calculating the effective thermal conductivity of moisture-containing highly porous gas-filled polymer materials is proposed, which considers a model of a wet material with a solid skeleton, more accurately takes into account the resistance of the porous medium of vapor diffusion, defines the conditions for the transition from partial wetting of the pore surface with liquid to complete without the need for empirical coefficients. A computational experiment was conducted, the results of which show the mutual influence of moisture content, porosity and polymer concentration on the effective thermal conductivity of the material at a given temperature.

Keywords: material structure, wet foam, effective thermal conductivity, vapor diffusion, porosity, moisture content, mathematical model.

УДК 691.263.5

**КОМПЛЕКСНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА
НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО**

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

Представлены результаты исследований двухкомпонентной минеральной добавки на основе промышленных отходов для гипсового вяжущего. Рассмотрены составы комплексной добавки при сочетании двух компонентов: байпасная пыль и дефекат, байпасная пыль и шлам водоподготовки. Показано влияние комплексной добавки на микроструктуру гипсового камня. Определены сроки схватывания гипсового вяжущего, а также показатели водопоглощения и прочностные характеристики гипсового камня в возрасте 7 и 28 суток. Установлено, что совместное введение байпасной пыли и шлама водоподготовки позволяет увеличить прочность на изгиб, прочность на сжатие. Установлено, что введение дефеката в сочетании с байпасной пылью замедляет сроки схватывания гипсового вяжущего, обеспечивая тем самым снижение водопоглощения и прочности на сжатие.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, шлам водоподготовки, байпасная пыль, дефекат, водопоглощение, микроструктура, сроки схватывания, прочность на изгиб, прочность на сжатие.

Введение. Материалы и изделия из гипса на сегодняшний день – одни из наиболее востребованных на строительном рынке. Высокий спрос объясняется следующими преимуществами: хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, пожаробезопасностью, сравнительно низкой плотностью, экономичностью, а также их применение способствует поддержанию комфортного микроклимата в помещениях. Однако по сравнению с цементными составами имеются и некоторые недостатки: низкая прочность и водостойкость, недостаточная морозостойкость, ограничивающие область применения материалов и изделий из гипса условиями эксплуатации с относительной влажностью воздуха не более 60%.

Неводостойкость гипса объясняется [1] высокой растворимостью двугидрата сульфата кальция, его высокой проницаемостью и расклинивающим действием молекул воды при проникновении в межкристаллические полости. Для повышения водостойкости гипсовых изделий используются различные подходы, включая: введение минеральных и модифицирующих добавок, уплотнение, пропитку и обмазку веществами, препятствующими проникновению влаги. Одним из эффективных способов повышения водостойкости гипсовых вяжущих является введение в его состав минеральных добавок, вступающих с ним в химическое взаимодействие с образованием водостойких и твердеющих в воде продуктов как в результате химической реакции с гипсовым вяжущим, так и вследствие собственной гидратации. В этой связи несомненный интерес представляют собой отходы промышленности, содержащие в своем составе соединения, способные к такому взаимодействию. Применение отходов в производстве строительных материалов позволяет снизить объемы их хранения, а также улучшить экологическую ситуацию в промышленных регионах. Разработка на основе промышленных отходов комплексной минеральной добавки, обеспечивающей повышение водостойкости и физико-механических характеристик гипсового вяжущего, выступает как актуальная задача, подтверждающая необходимость данного исследования.

Основная часть. Изучению вопросов повышения водостойкости гипсовых вяжущих и механизму их твердения, посвящены работы А.В. Волженского. Разработанное им гипсоцементнопуццолановое вяжущее (ГЦПВ), состоит из 50–80% строительного гипса, 15–25% портландцемента и 10–25% гидравлической добавки [2]. Полученное вяжущее является быстротвердеющим (начало 4 мин, конец 20 мин) и водостойким ($K_p = 0,75–0,85$), имеет марки по прочности 100, 150. Бетоны на ГЦПВ на основе строительного гипса имеют марки 150, 200 с прочностью до 8 МПа через 2 часа [2]. Механизм структурообразования описан следующим образом: при затворении водой ГЦПВ происходит гидратация полуводного гипсового вяжущего и схватывание, а выделяющиеся кристаллы двугидрата сульфата кальция создают каркас первоначальной структуры. Портландцемент и гидравлические добавки способствуют формированию новообразований, которые являются связкой, цементирующей крупные кристаллы двугидрата сульфата кальция и защищающей их от взаимодействия с водой [2].

Автором [3], Н.В. Чернышевой, получены составы водостойких гипсовых композиционных материалов с применением техногенного сырья. Предложены и исследованы новые для строительного материаловедения виды минеральных добавок – отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, существенно отличающиеся от традиционно применяемого кварцевого сырья. Опытным путем установлены отношения между минеральной добавкой и портландцементом, обеспечивающие оптимальные ус-

ловия твердения композиционного гипсового вяжущего (КГВ). Показано, что разработанное КГВ обладает высокими показателями предела прочности на сжатие (22 МПа), коэффициент размягчения составляет 0,8. Экспериментально доказано, что минеральная добавка активно участвует в процессе гидратации, способствуя тем самым формированию нано- и микроразмерных низкоосновных гидросиликатов кальция, уплотняющих структуру и обеспечивающих повышение прочности и водостойкости затвердевшего гипсоцементного камня.

Композиционные гипсовые вяжущие различаются по своим физико-механическим характеристикам в зависимости от вида гипсового вяжущего и гидравлической активности минеральной добавки. Так, в работе [4] представлены результаты исследований вяжущего, состоящего из гипсовой штукатурки, таурита марки «ТС-D» и кремнезёмсодержащей добавки. Содержание комплексной добавки из таурита и кремнезёма составляло 1% от массы гипсового вяжущего. Подобраны составы композиционного гипсового вяжущего, обеспечивающие показатели предела прочности на сжатие 5,4 МПа, коэффициент размягчения – 0,45. Показано [4], что введение добавок способствовало интенсификации процесса гидратации и образованию более плотной мелкопористой структуры, что увеличило площадь контакта между кристаллическими новообразованиями и улучшило долговечность гипсовой матрицы. Отмечается [4], что задача минеральных добавок заключается в изменении скорости выращивания кристаллов, их морфологии и кристаллографических разновидностей.

Влияние минеральной добавки на основе промышленных отходов – керамзитовой пыли и гранулированного доменного шлака – на свойства гипсового вяжущего представлены в работе [5]. Показано, что введение керамзитовой пыли в количестве 20% и доменного шлака в количестве 30% от массы вяжущего вещества в комплексе с известью и пластификатором позволило получить гипсовый камень с более плотной и мелкозернистой структурой в отличие от состава без модификаторов, с пределом прочности на сжатие 30 МПа. Исследования показали, что в результате взаимодействия извести с керамзитовой пылью и гранулированным доменным шлаком образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, которые заполняют поры, дополнительно укрепляя контакты срастания кристаллов двуводного гипса, ограничивая тем самым возможность проникновения к ним воды и их растворения.

Эффективность композиционного гипсового вяжущего с минеральной добавкой керамзитовой пыли и отсевов мелкозернистого бетона в количестве 20% от массы гипсового вяжущего исследована в работе [6]. Авторами установлено, что отсева мелкозернистого бетона выступают в качестве пуццолановой добавки. Данные отходы содержат продукты гидратации цемента, которые включают гидросиликаты кальция группы CSH_2 , гидроксид кальция, непрореагировавшие частицы цемента, которые могут выступать как центры кристаллизации новообразований, что способствует увеличению прочности на сжатие затвердевшего гипсового вяжущего до 28,1 МПа.

Цель предлагаемого нами исследования – изучение структуры и физико-механических свойств гипсового вяжущего с минеральной двухкомпонентной добавкой двух составов, включающих байпасную пыль и дефекат, байпасную пыль и шлам водоподготовки.

Характеристика материалов и методика проведения исследований. Для проведения экспериментальных исследований использовался гипс строительный «Тайфун Мастер» № 35 марки Г-5 ША производства ООО «Тайфун» по ГОСТ 125 [7]. В качестве компонентов минеральной добавки использовались: байпасная пыль ОАО «Кричевцементношифер», дефекат Слуцкого сахарорафинадного комбината, шлам водоподготовки Новополоцкой ТЭЦ.

Для проведения исследований шлам водоподготовки, дефекат и байпасная пыль просеивались через механическое сито № 02. Размер частиц, подготовленных проб материалов, определялся при помощи метода лазерной дифракции, основанном на принципе рассеяния электромагнитных волн, на лазерном дифрактометре гранулометрического состава вещества фирмы Fritsch (Analysette 22 Micro Tec, Германия). Удельную поверхность определяли на приборе ПСХ-12 и NOVA2200. Действие прибора ПСХ-12 основано на измерении удельной поверхности порошковых материалов методом по воздухопроницаемости и пористости уплотненного слоя порошка и соответствующих ей среднemasсовых размеров частиц. Определение удельной поверхности на приборе NOVA2200 основано на методе БЭТ и включает две стадии: оценку по изотерме адсорбции емкости монослоя и расчет удельной поверхности с использованием молекулярной площади газа. В таблице 1 представлен фракционный состав и показатели удельной поверхности материалов.

В составе дефеката преобладают частицы (61,7%) размером 10–20 и 20–50 мкм, удельная поверхность дефеката составляет 10 м²/г. Шлам водоподготовки имеет более высокую удельную поверхность, составляющую 20 м²/г; 64,59% – это частицы размером 5–10 и 10–20 мкм. Байпасная пыль представлена более крупными частицами, размер которых 20–50 и 50–100 мкм, их количество составляет 72,35%, удельная поверхность – 8 м²/г.

Таблица 1. – Фракционный состав и удельная поверхность материалов

Наименование материала	Выход фракций (мкм), %										Удельная поверхность, м ² /г
	0,05–1,0	1–2	2–3	3–4	4–5	5–10	10–20	20–50	50–100	100–200	
Дефекат	3,90	0,94	1,57	0,82	0,80	10,34	27,33	34,37	19,19	0,74	10
Шлам водоподготовки	6,90	1,89	1,10	2,03	2,98	30,33	34,26	20,50	0,01	0,00	20
Байпасная пыль	3,24	1,32	1,52	1,32	1,45	5,00	13,17	32,45	39,90	0,63	8

Изучение микроструктуры и химического анализа промышленных отходов и образцов гипсового камня проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDXJED-2201 (JEOL, Япония). Химический состав материалов представлен в таблице 2.

Таблица 2. – Химический состав материалов

Наименование материалов	Оксидный состав, %							
	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	K ₂ O	SO ₃
Дефекат	81,1	4,63	0,99	8,84	4,44	–	–	–
Шлам водоподготовки	92,85	4,82	0,78	1,55	–	–	–	–
Байпасная пыль	70,17	–	3,16	14,26	–	5,02	3,31	4,56

Для проведения исследований дефекат модифицировали путём термоактивации при температуре 200 °С в режиме мягкого нагрева и термоудара [8]. При мягком нагреве дефекат помещали в холодный сушильный шкаф марки SNOL 58/350 и нагревали до заданной температуры, выдерживали в течение одного часа и охлаждали. При режиме «термоудар» дефекат помещали в сушильный шкаф SNOL 58/350, предварительно нагретый до заданной температуры, выдерживали в течение одного часа, затем охлаждали. Термоактивированный дефекат просеивали на механических ситах. Для проведения исследований дефекат растворяли при перемешивании в воде, после чего засыпали гипс.

Шлам водоподготовки Новополоцкой ТЭЦ предварительно высушивали в сушильном шкафу SNOL 58/350 в течение пяти часов до постоянной массы при температуре 110 °С. Высушенный шлам после охлаждения размалывали и просеивали на механических ситах.

Определение физико-механических характеристик гипсового вяжущего с комплексной добавкой проводилось на стандартных образцах-балочках размером 4×4×16 см, подготовленных из теста нормальной плотности. Образцы выдерживались в нормальных условиях при температуре 20±2 °С и относительной влажностью воздуха 95±5% в течение 7 и 28 суток, после чего определялась прочность образцов-балочек, высушенных до постоянной массы, на прессе гидравлическом марки ПГМ-500 МГ 4А в соответствии с ГОСТ 23789 [8].

Для проведения исследований приняты следующие дозировки компонентов минеральной добавки: байпасная пыль в количестве 5% от массы гипсового вяжущего и дефекат сахарного производства в количестве 5%, 10 и 15% от массы гипсового вяжущего; байпасная пыль в количестве 5% от массы гипсового вяжущего и шлам водоподготовки в количестве 5%, 10 и 15% от массы гипсового вяжущего.

Дозировка байпасной пыли 5% от массы гипсового вяжущего была определена в ранее проведённых исследованиях, при данной дозировке байпасной пыли получены наибольшие значения прочности на изгиб и сжатие гипсового камня в возрасте 28 суток по сравнению с контрольными составами 5,6 и 11,9 МПа соответственно.

Результаты исследований по определению физических характеристик гипсового камня с комплексной добавкой приведены в таблице 3, из которой видно, что при введении байпасной пыли в сочетании с дефекатом максимальное снижение водопоглощения на 16,3% по сравнению с контрольными образцами без добавок достигнуто для состава 3 (см. таблицу 3) при дозировке компонентов минеральной добавки от массы гипсового вяжущего, составляющей: 5% байпасная пыль и 15% дефекат. Водопоглощение образцов гипсового камня с комплексной добавкой на основе байпасной пыли и шлама

водоподготовки снижается на 51% (состав 5, см. таблицу 3) по сравнению с бездобавочным составом при следующем сочетании компонентов: 5% – байпасная пыль, 5% – шлам водоподготовки; на 34,7% (состав 7, см. таблицу 3) при введении 5% байпасной пыли и 15% шлама водоподготовки. Установлено, что введение байпасной пыли в состав гипсового вяжущего в сочетании с дефекатом позволяет значительно отдалить наступление начала и конца сроков схватывания.

Таблица 3. – Физические свойства гипсового камня с комплексной добавкой

Номер состава	Состав комплексной добавкой	Дозировка компонентов, % от массы гипсового вяжущего	Сроки схватывания, ч-мин		Плотность, кг/м ³	Водопоглощение, %	Общая пористость, %
			начало	конец			
1	Без модификатора	0	0-3	0-12	1625	4,9	7,9
2	Байпасная пыль+дефекат	5+5	0-19	0-59	1496	7,2	10,8
3	Байпасная пыль+дефекат	5+10	0-16	1-21	1559	4,1	6,4
4	Байпасная пыль+дефекат	5+15	0-19	1-48	1500	11,0	16,5
5	Байпасная пыль+шлам	5+5	0-10	0-15	1621	2,4	3,9
6	Байпасная пыль+шлам	5+10	0-6	0-13	1476	7,3	10,8
7	Байпасная пыль+шлам	5+15	0-12	0-16	1641	3,2	5,3

На рисунке 1 представлена микроструктура гипсового камня без добавок, с комплексной минеральной добавкой, включающей байпасную пыль и дефекат, а также байпасную пыль и шлам водоподготовки. Микроструктура образцов гипсового камня без добавок (рисунок 1, а) представлена удлиненными игольчатыми кристаллами двуводрата сульфата кальция, хаотично и неупорядоченно расположенными в матрице. Кристаллы имеют призматическую, пластинчатую форму. Структура гипсового камня характеризуется пористостью, с размером пор до 10 мкм.



Рисунок 1. – Микроструктура гипсового камня в возрасте 28 суток при увеличении 2000 крат: гипсовый камень без добавок (а); гипсовый камень с добавкой байпасной пыли 5% и дефеката 15% (б); гипсовый камень с добавкой байпасной пыли (5%) и шлама водоподготовки 15% (в)

В присутствии комплексной добавки на основе байпасной пыли и дефеката кристаллы двуводрата сульфата кальция изменили свою форму и размер, появились кристаллические сростки, характеризующиеся уменьшенной длиной и увеличившейся шириной по сравнению с кристаллами двуводрата сульфата кальция гипсового камня без добавок. В микроструктуре гипсового камня отчетливо видны частицы дефеката сферической формы, которые заполняют пространство между укрупненными кристаллами дву-

гидрата сульфата кальция, дополнительно уплотняя и упрочняя его структуру (рисунок 1, б). Данные электронно-микроскопического анализа показывают, что в присутствии комплексной добавки на основе байпасной пыли и шлама водоподготовки кристаллы двуводрата сульфата кальция не изменили свою форму и размер, но в отличие от гипсового камня без добавок микроструктура характеризуется меньшей пористостью (рисунок 1, в).

Результаты исследований по определению механических свойств гипсового камня с комплексной добавкой представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Механические свойства гипсового камня с комплексной добавкой

Номер состава	Состав комплексной добавки	Дозировка компонентов, % от массы вяжущего вещества	Прочность в возрасте 7 сут, МПа (%)		Прочность в возрасте 28 сут, МПа (%)	
			на изгиб	на сжатие	на изгиб	на сжатие
1	Без модификатора	0	2,9 (100,0)	4,8 (100,0)	3,2 (100,0)	7,2 (100,0)
2	Байпасная пыль+дефекат	5+5	3,8 (123,7)	5,5 (112,7)	3,6 (111,1)	6,9 (95,8)
3	Байпасная пыль+дефекат	5+10	3,1 (106,5)	5,1 (105,9)	3,1 (96,8)	5,6 (77,8)
4	Байпасная пыль+дефекат	5+15	3,2 (109,4)	5,1 (105,9)	5,6 (142,8)	5,5 (76,4)
5	Байпасная пыль+шлам	5+5	3,8 (123,7)	5,7 (115,8)	3,1 (96,8)	5,4 (75,0)
6	Байпасная пыль+шлам	5+10	2,9 (100,0)	5,4 (111,1)	3,2 (100,0)	7,3 (98,6)
7	Байпасная пыль+шлам	5+15	3,2 (109,4)	4,9 (102,0)	4,9 (134,7)	9,3 (122,6)

Данные электронно-микроскопического анализа получили подтверждение при определении механических свойств гипсового камня. Экспериментально установлено, что введение в гипсовое вяжущее байпасной пыли в количестве 5% и дефеката в количестве 15% от массы гипсового вяжущего (состав 4, см. таблицу 4) приводит к увеличению прочности на изгиб образцов гипсового камня в возрасте 28 суток на 42,8%, но при этом прочность на сжатие уменьшилась на 23,6%. Введение байпасной пыли в комплексе со шламом водоподготовки (состав 7, см. таблицу 4) позволяет увеличить прочность на изгиб и на сжатие в возрасте 28 суток на 34,7% и на 22,6% соответственно.

Заключение. Проведённые исследования показали, что комплексная минеральная добавка на основе байпасной пыли в количестве 5% от массы гипсового вяжущего и шлама водоподготовки в количестве 15% от массы гипсового вяжущего позволяет получить гипсовый камень с более плотной структурой. Введение добавки обеспечивает повышение показателя прочности на сжатие до 9,3 МПа и снижение водопоглощения на 34,7%. Комплексная добавка на основе байпасной пыли в количестве 5% от массы гипсового вяжущего и дефеката в количестве 10% от массы гипсового вяжущего позволяет отдалить наступление сроков начала и конца схватывания, а также снизить водопоглощение на 16,3%, но при этом происходит снижение показателя прочности на сжатие в 1,3 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белякова, Н.А. Повышение водостойкости строительного гипса / Н.А. Белякова, В.Н. Рубцова, Е.А. Осипова // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской науч.-метод. конф., Оренбург, 1–3 февр. 2017 г. – Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2017. – С. 573–579.
2. Волженский, А.В. Гипсоцементнопуццолановые вяжущие, бетоны и изделия / А.В. Волженский, В.И. Стамбулко, А.В. Ферронская. – М. : Стройиздат, 1971. – 318 с.
3. Чернышева, Н.В. Водостойкие гипсовые композиционные материалы с применением техногенного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / Н.В. Чернышева. – Белгород, 2014. – 40 с.
4. Study of modified gypsum binder / N. Kondratieva [et al.] // Construction and building materials – 2017. – № 149. – С. 535–542.
5. Влияние добавки извести на физико-механические свойства композиционных гипсоизвестковопуццолановых вяжущих / М.И. Халлилуин [и др.] // Известия КГАСУ. – 2015. – № 4. – С. 304–311.

6. Использование кремнеземсодержащих промышленных отходов в технологии композиционных гипсовых вяжущих / И.В. Старостина [и др.] // Вестник Белгород. технол. ун-та. – 2016. – Т. 19. – № 13. – С. 304–311.
7. Вяжущие гипсовые. Технические условия : ГОСТ 125-79 / Госстрой ССР. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 5 с.
8. Использование дефеката, активированного СВЧ-излучением, в составе гипсовых композиционных вяжущих / М.Ю. Федорина [и др.] // Новая наука: современное состояние и пути развития. – 2016. – № 6–2. – С. 218–221.
9. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний : ГОСТ 23789-2018 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М. : Стандартинформ, 2018. – 16 с.

Поступила 23.12.2019

COMPLEX MINERAL ADDITIVE BASED ON INDUSTRIAL WASTE FOR GYPSUM BINDERS

A. KATULSKAYA, L. PARFENOVA

The paper presents the results of studies of a two-component mineral additive based on industrial waste for a gypsum binder. The compositions of the complex additive are considered with the combination of two components: bypass dust and defecate, bypass dust and sludge of water treatment. The effect of a complex additive on the gypsum stone microstructure is shown. The timing of setting of a gypsum binder, as well as water absorption and strength characteristics of gypsum stone at the age of 7 and 28 days are determined. It was found that the combined introduction of bypass dust and sludge of water treatment can increase bending strength, compressive strength. It was found that the introduction of defecate in combination with bypass dust slows down the setting time of the gypsum binder, provide reduction in water absorption and times compression strength.

Keywords: gypsum binder, water treatment sludge, bypass dust, defecate, water absorption, microstructure, setting time, bending strength, compressive strength.

УДК 691.162

МОНИТОРИНГ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

*канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; канд. техн. наук А.Н. ЯГУБКИН;
Е.С. БОРОВКОВА; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Представлен комплекс работ по диагностике структурных изменений, происходящих в цементных системах. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния цементных образцов и явлений акустической эмиссии, возбуждаемых в образцах в режиме одноосного деформирования. Получены экспериментальные данные, связывающие характеристики акустической эмиссии с механизмом деформирования бетонного образца. Приведенные закономерности могут послужить основой для создания критерия оценки степени опасности бетонных повреждений на объектах различного назначения.

Ключевые слова: мониторинг, глубинный датчик, тензометрия, акустическая эмиссия, бетонные конструкции, динамика трещинообразования.

Введение. Одна из важнейших задач в строительстве – обеспечение безопасной эксплуатации объектов. При этом особое внимание представляют конструкции, изготовленные из бетона как наиболее распространенного и востребованного строительного материала. Без понимания физических процессов, вызывающих те или иные изменения свойств бетона во времени под воздействием силовых, а также иных факторов, трудно обеспечить заданный уровень надежности конструкций [1].

Для корректного определения остаточного ресурса конструкций исходные данные необходимо определять по результатам натурных испытаний и измерений, что не всегда возможно. Решением является создание и применение систем контроля и мониторинга за состоянием объектов [2].

В качестве первичных датчиков для получения информации, характеризующей параметры нагруженности и напряженного состояния конструкции, используются тензодатчики [3]. В данной работе авторами использованы ранее разработанные [4] так называемые «глубинные датчики» [5–8].

При исследовании напряженно-деформированного состояния бетона особое значение следует уделять его структуре, эволюции, а также развитию дефектов, которые могут привести к разрушению бетона. Поэтому, помимо тензометрического метода, было принято решение использовать акустико-эмиссионный (АЭ) метод [9]. Основная задача акустико-эмиссионного контроля состоит в выявлении показателей, характеризующих образование и рост трещин в бетонной конструкции, таких как место и время их образования, оценка размера трещины.

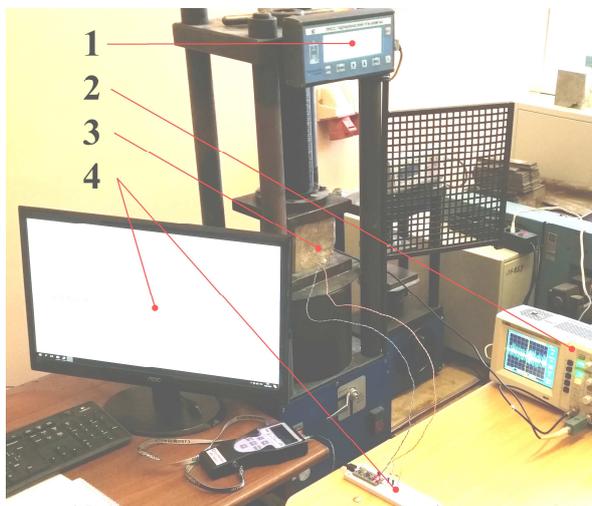
Согласно выдвигаемой гипотезе, параллельное использование сразу нескольких методов исследования (тензометрический, акустико-эмиссионный) позволит создать эффективный инструмент мониторинга состояния строительных бетонных конструкций, предоставляя при этом наиболее полную информацию об интересующем нас объекте.

Исследовательская часть. В качестве опытных образцов выбраны цементные кубы размерами 100×100×100 мм, с водоцементным отношением 0,4. Данный размер обусловлен удобством размещения сразу нескольких видов датчиков как снаружи, так и внутри испытываемых образцов. Нагружение образцов производилось прессом ПГМ-500МГ4А с шагом нагрузки 25 кН. Данные, полученные в ходе испытаний, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний цементных кубов на сжатие

№ нагружения	Нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Деформации, мм	№ нагружения	Нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Деформации, мм
0	0	0	0	8	202,7	20,27	1,09
1	22,9	2,29	0,35	9	229,5	22,95	1,22
2	52,3	5,23	0,47	10	249,3	24,93	1,32
3	78,5	7,85	0,56	11	280,2	28,02	1,45
4	102,3	10,23	0,68	12	303,7	30,37	1,56
5	128,5	12,85	0,78	13	332,2	33,22	1,79
6	154,3	15,43	0,89	14	349,0	34,9	1,89
7	178,1	17,81	1	15	–	Ресурс исчерпан	

При проведении испытаний использовались: установка для нагружения – пресс гидравлический ПГМ-500МГ4А; пьезодатчик для регистрации АЭ; осциллограф и компьютер. Измерительный комплекс представлен на рисунке 1.



1 – пресс гидравлический; 2 – осциллограф;
3 – пьезодатчик (датчик АЭ);
4 – тензометрическая схема с программным обеспечением «PhyZModule» [10]

Рисунок 1. – Общий вид созданной системы

Главная особенность данной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния бетона и цементных систем состоит в том, что параллельно друг другу осуществляется контроль механических напряжений с помощью глубинных датчиков (активный метод) и прослушивание явлений акустической эмиссии микрофоном (пассивный метод).

Дальнейшая фиксация и классификация явлений акустической эмиссии в образце производились согласно таблице 2.

Таблица 2. – Классификация параметров АЭ в зависимости от целостности структуры бетонного образца

Характеристики деформирования и разрушения	Характеристики АЭ
<i>стадия уплотнения</i> ($0 \div (0,3-0,5)R_{пр}$): - сдвиги начальных дефектов материала; - разрыв отдельных структурных связей	- единичная эмиссия со слабыми амплитудами сигналов высокой частоты
<i>стадия появления микротрещин</i> ($0,3R_{пр} \div 0,8R_{пр}$): - возникновение микротрещин и микродефектов в локальных зонах микроразрушения; - образуется развивающаяся сеть микротрещин	- высокая частота импульсов и увеличение их амплитуд
<i>стадия появления макротрещин</i> ($> 0,8 R_{пр}$): - образование магистральных трещин, выходящих на поверхность; - стремительное развитие разрушения	- сильная эмиссия с большими амплитудами пониженной частоты
<i>стадия активного разрушения</i> ($> 0,96R_{пр}$): - полное разрушение материала	- кратковременное затухание эмиссии с ее стремительным возрастанием перед разрушением образца

В ходе исследования важно выделить и обработать полученную информацию из общего массива данных [9]. Зависимость максимальной амплитуды АЭ от механической нагрузки представлена на рисунке 2. При нагружении образца поэтапно в сторону увеличения его суммарная деформация складывалась из упругой и неупругой составляющих, соотношение между которыми на разных стадиях нагружения различалось. На начальной стадии нагружения происходит разрушение слабых связей между отдельными структурными элементами. При этом возникают преимущественно неупругие деформации.

Указанное разрушение сопровождается значительной активностью акустической эмиссии, что видно из графика Фурье (F1–F14), отображенного на рисунке 2. На этапе (F1–F6) максимальная деформация образца составляет 0,89 мм.

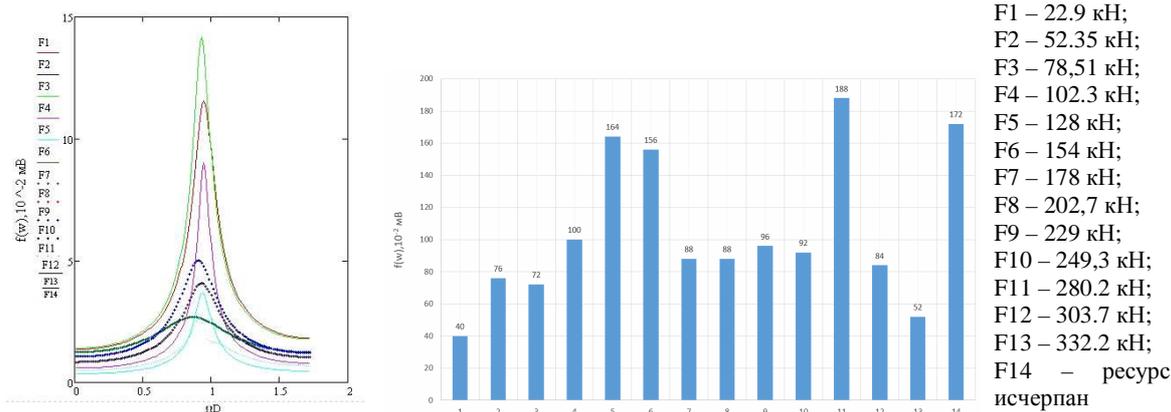


Рисунок 2. – Зависимость максимальной амплитуды АЭ от механической нагрузки

По мере дальнейшего монотонного увеличения нагрузки соотношение менее и более прочных связей между отдельными структурными элементами постоянно меняется в пользу последних. При этом ААЭ уменьшается. При достижении некоторых значений напряжений в образце достигается состояние максимального уплотнения. Это состояние характеризуется минимумом действующих и возникающих дефектов, а значит и минимумом ААЭ, возникающей под влиянием нагружения. На графике это можно проследить на участках F7–F10.

При превышении нагрузкой некоторого порогового значения происходит образование новых дефектов и, как следствие, рост ААЭ, что видно на рисунке 2 (F11). Таким образом, именно на участке нагружения, где имеет место состояние максимального уплотнения образца, преобладают упругие деформации, а ААЭ минимальна.

Согласно данному графику также можно выделить две зоны, которые соответствуют неупругой и упругой деформациям. При превышении 178 кН в образце преобладают упругие деформации, что подтверждается анализом, приведенным выше.

Одновременно с прослушиванием АЭ велась запись данных, получаемых с прессы ПГМ-500МГ4А и глубинных датчиков, с использованием программного обеспечения «PhyZModule» [10]. Полученные в ходе исследования данные позволили построить графики напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) бетонного образца, а также график зависимости изменения напряжения тензометрической системы во времени (рисунок 3).

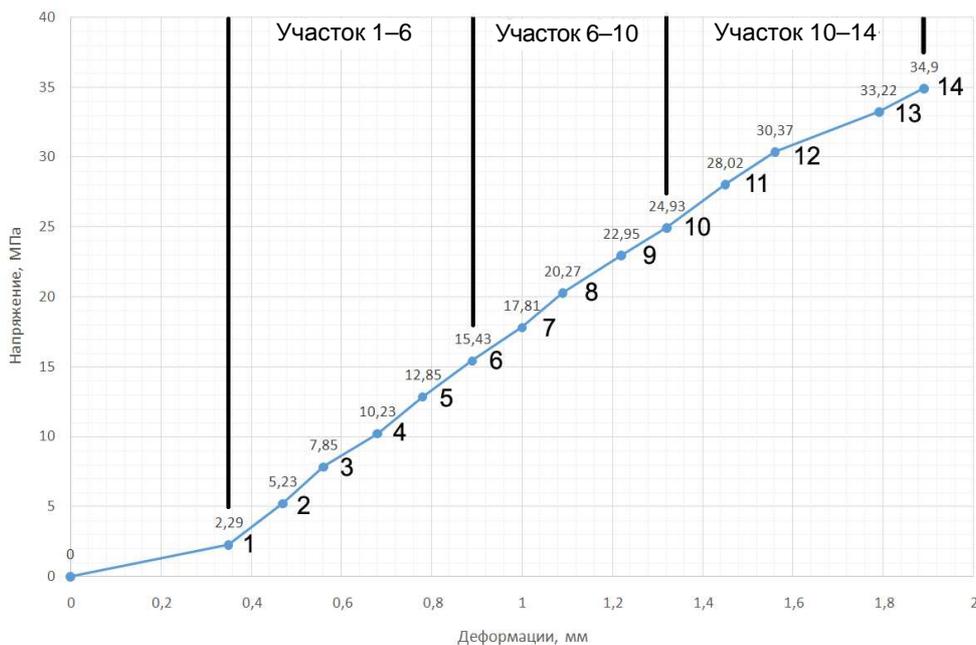


Рисунок 3. – Изменение напряженно-деформированного состояния цементного образца по показаниям гидравлического прессы ПГМ-500МГ4А

Графики, представленные на рисунке 3, для наглядности были разделены на 15 участков.

На участке 1–6 прослеживается уплотнение структуры и формирование микротрещин в исследуемом цементном образце. Состоянием максимального уплотнения принимаем точку 6, что соответствует 15,43 МПа ($\sigma_c = 0,44f_{cm}$).

Участок 6–10 принимаем за стадию формирования макротрещин, постепенно выходящих на поверхность образца. Точка 10, соответствует напряжению 24,93 МПа ($\sigma_c = 0,71f_{cm}$).

Участок 10–14 является стадией активного разрушения цементного образца. В точке 14 наблюдается напряжение, равное 34,9 МПа, что свидетельствует о достижении образцом предела прочности.

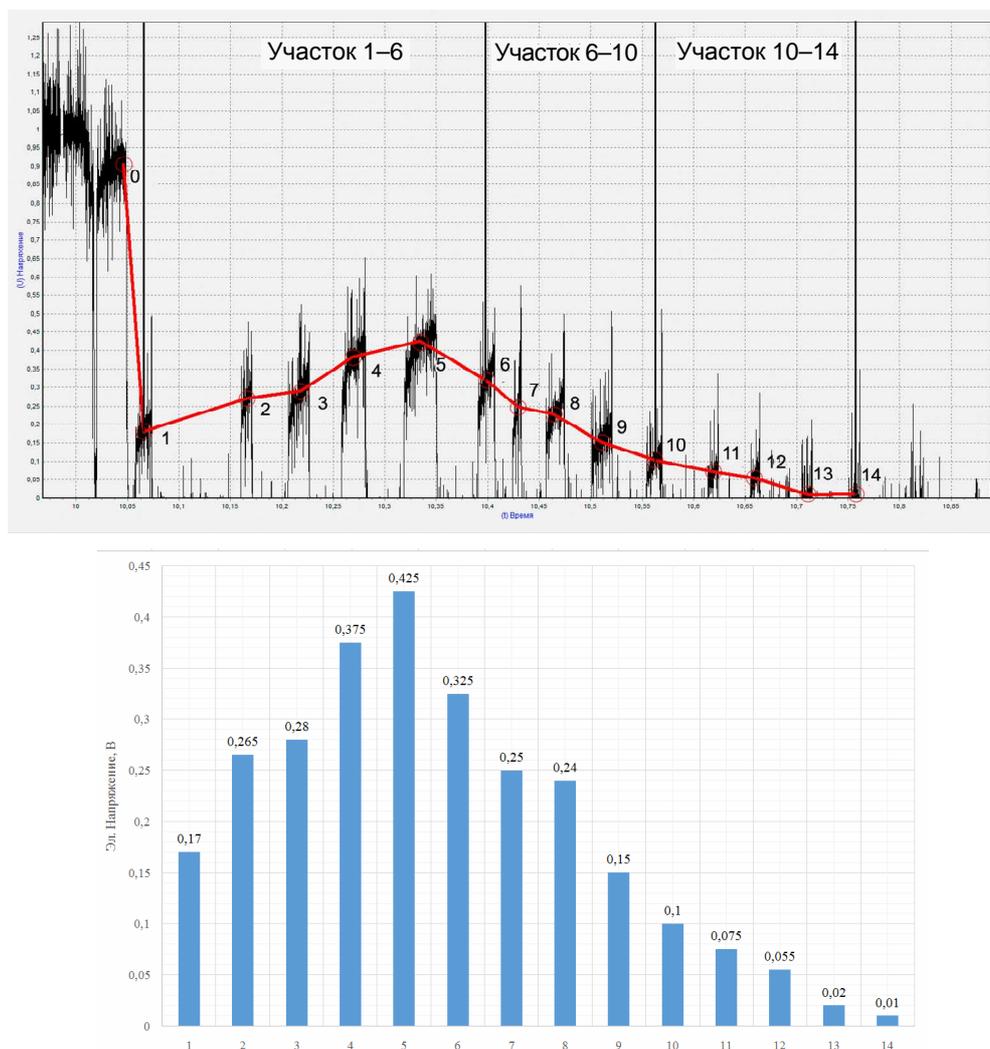


Рисунок 4. – Изменение электрического напряжения тензометрической системы и глубинного датчика во времени, записанное с помощью ПО “PhyZModule” [10]

Таким образом, применение двух методов позволяет с более высокой достоверностью получать области упругих деформаций и избежать накопления пластических. Совершенствуя датчики и установку для контроля за напряженно-деформированным состоянием цементных систем возможно добиться предупреждения и предотвращения возможных обрушений бетонных и железобетонных конструкций.

Выводы. Проведенные исследования позволяют представить механизм развития структурных дефектов в цементных системах следующим образом: с помощью двух типов датчиков (глубинный и акустической эмиссии) ведется контроль за формированием и дальнейшим развитием микродефектов (трещин) в структуре цементных образцов. При этом созданная система предусматривает обработку сразу нескольких входящих сигналов, что подразумевает ее многоканальность.

В перспективе данный комплекс будет использоваться для определения переходного этапа трещинообразования бетонных и железобетонных конструкций, исходя из их энергетических уровней, по параметрам звуковой волны (которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия) и глубинного датчика, характеризующего механические изменения, непосредственно изнутри конструкции.

Таким образом, с помощью регистрации данных акустической эмиссии определена связь между акустическими сигналами и деформационными изменениями в бетонных образцах.

Опираясь на результаты проведенных исследований, можно констатировать, что совокупность методов тензометрии и акустической эмиссии предоставляет *возможность сопровождения* бетонных объектов. Это выражается в получении сигналов, свидетельствующих о возникновении и развитии дефекта в режиме реального времени, а также в определении ресурса бетонной конструкции на любой стадии эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковшар, С.Н. Изменение структурно-механических характеристик цементного камня при циклическом воздействии внешней среды / С.Н. Ковшар // Строительная наука и техника: науч.-техн. журн. – 2010. – № 1-2. – С. 60–63.
2. Шешуков, А.Н. Применение телеметрических систем для мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций / А.Н. Шешуков // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. трудов ; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск, 2001. – С. 402–404.
3. Измерения в промышленности : справ. изд.: в 3-х кн. – 2-е изд., перераб. и доп. Кн. 1. ; пер. с нем. / под ред. проф. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1990. – 384 с.
4. Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
5. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М. : Госстройиздат, 1962. – С. 160–173.
6. Безгодков, И.М. К вопросу о методике исследования бетона в условиях трехосного сжатия [Электронный ресурс] / И.М. Безгодков, И.А. Горбунов, П.Ю. Шульгин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – Режим доступа: <http://ramag.ru/src/pressa/076.pdf>.
7. Ватуля, Г.Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагуря, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – к. 2. – С. 48–56.
8. Макаренко, С.Ю. Применение глубинных датчиков на основе тензорезисторов при исследовании деформаций ползучести тяжелого бетона / С.Ю. Макаренко // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : материалы науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения проф. Н.Н. Леонтьева и 110-летию проф. В.З. Власова / МГСУ, 2017. – С. 74–77.
9. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге структуры бетона / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
10. Змитрович, С.Ю. Обработка аналоговых сигналов датчиковой аппаратуры. Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) [Электронный ресурс] / С.Ю. Змитрович, С.А. Вабищевич // Электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. – С. 272–275.

Поступила 04.12.2019

MONITORING THE STRUCTURAL STATE OF CEMENT SYSTEMS BY ACOUSTIC EMISSION AND TENZOMETRY SIGNAL PARAMETERS

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, E. BOROVKOVA, E. TRAMBITSKY

A set of works on the diagnosis of structural changes occurring in cement-technical systems is presented. The results of experimental studies of the stress-strain state of cement samples and acoustic emission phenomena excited in the sample in the uniaxial deformation mode are presented. Experimental data have been obtained linking the characteristics of acoustic emission with the mechanism of deformation of a concrete sample. Corresponding patterns may lead to the emergence of a criterion for assessing the degree of danger.

Keywords: *monitoring, deep sensors, tensometry, acoustic emission, concrete structures, crack formation dynamics.*

УДК 666.9.015.7:666.9.015.8

КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО

канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА; Е.А. РАЗУЕВА
(Полоцкий государственный университет)

Приведены результаты исследований кинетики твердения золошлакощелочного вяжущего на основе измельченных золошлаковых отходов Белорусской ГРЭС. Установлены математические зависимости предела прочности на сжатие золошлакощелочного камня при варьировании в составе вяжущего расхода золошлаковой смеси, расхода и вида щелочного активатора, водозольного отношения. Определены значения концентрации для щелочных активаторов Na_2SiO_3 , КОН, NaOH и интервалы значений водозольного отношения, обеспечивающие достижение максимальных значений предела прочности на сжатие через 24 часа твердения в воздушно-сухих условиях. Определен предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня в возрасте 7, 14, 28, 56, 420 суток. Показано, что вид щелочного активатора оказывает существенное влияние на кинетику набора прочности золошлакощелочного камня: золошлакощелочные вяжущие с активаторами твердения Na_2SiO_3 и КОН отличаются интенсивным набором прочности в первые 24 часа твердения при использовании в качестве активатора твердения NaOH. Набор прочности продолжается и в более поздние сроки твердения – до 420 суток.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, активатор твердения, золошлакощелочное вяжущее, кинетика твердения.

Введение. В настоящее время в ГПО «Белэнерго» на местных видах топлива работает 10 теплоэлектростанций: Пинская ТЭЦ; Пружанская ТЭЦ; Лунинецкая ТЭЦ; Мини-ТЭЦ «Барань»; Белорусская ГРЭС; Речицкая мини-ТЭЦ; Жодинская ТЭЦ; Витебская мини-ТЭЦ; Бобруйская ТЭЦ-1; Осиповичская мини-ТЭЦ. В качестве топлива используются: щепа топливная по ТУ ВУ 100145188.003-2014; брикеты топливные на основе торфа – СТБ 1919-2008; лигнин – ТУ РБ 100145188.004-2006; топливо торфо-древесное – ТУ ВУ 600017380.003-2016. Объем золошлаковых отходов, образующихся в течение года, составляет около 13 тыс. тонн и находится на золоотвалах 119,8 тыс. тонн.

Развитие «зеленой» экономики – одно из приоритетных направлений Республики Беларусь, в рамках реализации которого предусматривается снижение негативного воздействия на окружающую среду и улучшение ее качественного состояния. Таким образом, для теплоэлектростанций, работающих на местных видах топлива, переход на «зеленые» материалы и технологии связан с решением вопроса утилизации и переработки золошлаковых отходов.

Активно развивается направление создания ресурсо- и энергосберегающих технологий, основанное на вовлечении золошлаковых отходов теплоэлектростанций в производство бесклинкерных вяжущих [1–6]. Разработан обширный класс бесклинкерных вяжущих с большим техническим, сырьевым, экологическим потенциалом. Существует несколько названий этой группы вяжущих: активированные щелочами цементы; щелочно-активированные вяжущие; щелочные цементы; щелочные вяжущие; геополимеры. Наиболее часто в разработках в качестве сырьевых компонентов используются металлургические и топливные шлаки и золы. Состав и свойства золошлаковых отходов варьируются в зависимости от вида сжигаемого топлива и технологии сжигания, поэтому полученные на их основе щелочные вяжущие отличаются по составу продуктов твердения, структуре и свойствам.

Анализ публикаций [1–6], посвященных геополимерным материалам, показывает, что в качестве сырья для получения геополимерных вяжущих могут использоваться золы-уноса класса F и золы-уноса класса C по ASTM C618. В стандарте ASTM C618 одним из главных различий между золой-уноса класса F и золой-уноса класса C служит нижний предел суммы оксидов ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Нижний предел ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) для золы-уноса класса F равен 70%, а для золы-уноса класса C – 50%. Соответственно зола-уноса класса F обычно имеет содержание оксида кальция около 15 вес.% или ниже, в то время как зола-уноса класса C обычно имеет более высокое содержание оксида кальция – выше 15%. По содержанию оксида кальция зола-уноса класса F может дополнительно подразделяться на «низкокальциевую летучую золу класса F» и на «высококальциевую летучую золу класса F». Если зола-уноса является высококальциевой золой класса F, содержание CaO в золе составляет от 8 до 15 вес.%. Если зола-уноса – низкокальциевая зола класса F, содержание CaO находится в пределах от 1 до 8 вес.%.

Химический состав золошлаковых отходов Белорусских теплоэлектростанций варьируется от низко- до высококальциевых зол класса F и зол класса C по ASTM C618. В данной работе в качестве сырьевого компонента щелочного вяжущего рассмотрены золошлаковые отходы Белорусской ГРЭС (г. п. Ореховск Витебская область). Усредненный химический состав золошлаковой смеси (мас.%) по ГОСТ 10538-87 представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС (мас.%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	ппп
87,62	4,39	1,08	3,08	0,55	0,61	1,79	0,24	0,19	< 0,10	0,07

Сумма оксидов (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) составляет 93,09 мас.%; содержание оксида кальция – 3,08 масс.%, что позволяет отнести золошлаковую смесь к низкокальциевой класса F по ASTM C618.

Ранее проведенные исследования [7] показали, что на процесс формирования прочности щелочного вяжущего, представляющего собой двухкомпонентную систему из зольной составляющей золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС и щелочного активатора гидроксида натрия, влияет дисперсность минеральной составляющей золы, температура и режим твердения. При увеличении удельной поверхности с 149 до 904 м²/кг прочность на сжатие золощелочного камня увеличивалась с 4 до 20 МПа. Установлено, что максимальное значение прочности золощелочного камня, равное 20 МПа, достигнуто после выдержки образцов в течение 24 часов в нормально-влажностных условиях и последующей температурной обработки – сушки при 60 °С в течение 24 часов. Однако твердение в последующие 28 суток привело к снижению прочности в 1,4 раза. Установленный факт снижения прочности золощелочного камня при последующем твердении в воздушно-сухих условиях в течение 28 суток указывает на необходимость изучения кинетики набора прочности в сроки твердения более 360 дней в зависимости от составов композиции, отличающихся дисперсностью золошлаковой смеси и видом щелочного активатора. Данные исследования направлены на подбор состава двухкомпонентной системы, которая обеспечит сохранение конечной прочности золощелочного вяжущего при эксплуатации изделий на его основе.

Материалы и методы исследований. Для проведения эксперимента использовалась золошлаковая смесь двух видов: *необработанная*, просеянная через сито с ячейкой 5 мм, и *механически активированная*. Механическую активацию золошлаковой смеси проводили путем измельчения в течение 60 минут в шаровой мельнице, мелющими телами в которой являлись шары различного диаметра.

Морфология необработанной золошлаковой смеси и золошлаковой смеси, измельченной в течение 60 минут, представлена на рисунке 1. Необработанная золошлаковая смесь содержит спекшиеся стекловидные алюмосиликатные микросферы с гладкой поверхностью размером от 20 до 60 мкм, частицы округлой неправильной формы размером более 100 мкм и кристаллы в виде пластин (рисунок 1, а). После измельчения золошлаковая смесь приобретает более однородный фракционный состав, представленный частицами неправильной формы размером менее 25 мкм (рисунок 1, б).

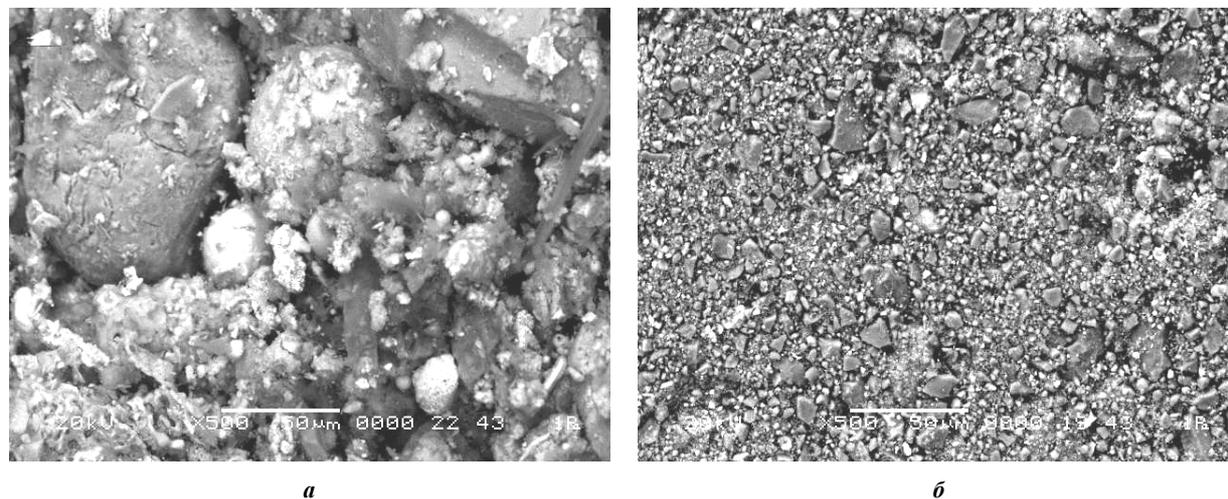


Рисунок 1. – Морфология необработанной золошлаковой смеси (а) и золошлаковой смеси, измельченной в течение 60 мин (б) ×500

Удельную поверхность золошлаковой смеси определяли на приборе NOVA2200. Определение удельной поверхности основано на методе БЭТ и включает две стадии: *оценку* по изотерме адсорбции емкости монослоя и *расчет* удельной поверхности с использованием молекулярной площади газа.

Удельная поверхность необработанной золошлаковой смеси составила 149 м²/кг, механоактивированной – 200 м²/кг.

Насыпная плотность золошлаковой смеси, плотность зерен определены по ГОСТ 9758 и составили 990 и 2100 кг/м³ соответственно. Влажность (2%) определена по ГОСТ 8735.

В качестве активаторов твердения использовались:

- гидроксид натрия (NaOH) по СТО 00203275-206-2007;
- безводный метасиликат натрия (Na_2SiO_3) по ТУ 2145-001-52257004-2002;
- гидроксид калия (KOH) по ТУ 2132-025-52257004-2015.

Золошлакощелочное вяжущее получали путем смешивания механоактивированной золошлаковой смеси со щелочным активатором и водой в течение 10...25 минут. Из полученной пластичной массы формовали образцы кубиков с размером ребра 20 мм. Образцы без предварительной выдержки помещали в сушильный шкаф SNOL, где они твердели в течение 24 часов при температуре 80 °С. Предел прочности на сжатие определяли через 24 часа, а также в возрасте 7, 14, 28, 56, 420 суток нормально-влажностного твердения.

Исследования проводились в два этапа. На *первом этапе* проводилась оптимизация концентрации щелочного активатора и водозольного отношения с применением математического планирования эксперимента. В качестве результативного фактора рассматривался предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня ($R_{сж}$). Планирование эксперимента проводилось с применением компьютерной программы «PlanExp B-D13», разработанной в среде программирования Microsoft Visual Basic 6.0. Программа ориентирована на работу с трехфакторным планом эксперимента B-D13, который позволяет получать нелинейные квадратичные модели и предусматривает проведение 10 опытов по 3 параллельных испытания в каждом. В качестве варьируемых факторов рассматривались: расход золошлаковой смеси в составе золошлакощелочного вяжущего (x_1); расход щелочного активатора (x_2); водозольное отношение (x_3).

При проведении эксперимента получены 10 отличающихся концентрацией щелочного активатора и водозольным отношением составов золошлакощелочного вяжущего, для которых был определен предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня в возрасте 24 часов (таблица 2).

Таблица 2. – Предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня в зависимости от вида и концентрации щелочного активатора

Номер опыта	Концентрация щелочного активатора, %	Водозольное отношение В/З	Предел прочности на сжатие $R_{сж}$, МПа, через 24 часа твердения в воздушно-сухих условиях при использовании щелочного активатора		
			NaOH	Na_2SiO_3	KOH
1	47	0,168	1,2	5,54	5,2
2	35	0,168	2,0	2,99	3,4
3	65	0,168	0,0	11,73	0,0
4	30	0,35	1,6	15,13	2,6
5	47	0,276	0,0	11,99	1,0
6	28	0,276	4,9	15,95	7,2
7	51	0,168	0,0	3,41	2,1
8	42	0,35	0,0	13,18	0,0
9	26	0,35	1,9	13,41	4,6
10	45	0,233	0,0	15,80	2,2

По результатам планирования эксперимента получены адекватные математические модели предела прочности на сжатие золошлакощелочного камня.

Математические модели имеют следующий вид:

- при использовании в качестве щелочного активатора гидроксида натрия (NaOH)

$$R_{сж} = 2,5 - 1,292 \cdot x_2 + 0,306 \cdot x_3 - 1,201 \cdot x_1^2 + 0,855 \cdot x_2^2 - 1,133 \cdot x_3^2 - 0,783 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,518 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,409 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (1)$$

- при использовании в качестве щелочного активатора метасиликата натрия (Na_2SiO_3)

$$R_{сж} = 10,98 + 0,969 \cdot x_2 + 3,763 \cdot x_3 + 0,697 \cdot x_1^2 + 4,286 \cdot x_2^2 - 4,398 \cdot x_3^2 + 1,262 \cdot x_1 \cdot x_3 - 2,472 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (2)$$

- при использовании в качестве щелочного активатора гидроксида калия (KOH)

$$R_{сж} = 4,095 + 1,003 \cdot x_1 - 2,292 \cdot x_2 - 1,252 \cdot x_1^2 + 0,7 \cdot x_2^2 - 1,423 \cdot x_3^2 + 0,434 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,472 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,155 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3)$$

По полученным полиномиальным математическим моделям построены трехмерные диаграммы (поверхности), представленные на рисунках 2–4.

Согласно представленным диаграммам при использовании в качестве активатора гидроксида натрия (NaOH) экстремум функции отклика составляет $R_{сж} = 4,988$ МПа при концентрации щелочного активатора в интервале 26...35% и водозольном отношении в интервале 0,214...0,305. При использовании в качестве активатора метасиликата натрия (Na_2SiO_3) максимальное значение предела прочности

на сжатие составляет $R_{сж} = 15,622$ МПа при концентрации щелочного активатора в интервале 26...37% и водозольном отношении в интервале 0,22...0,3. Экстремум функции отклика составляет $R_{сж} = 7,197$ МПа при использовании в качестве активатора гидроксида калия (KOH) при концентрации щелочного активатора в интервале 27...36% и водозольном отношении в интервале 0,214...0,282.

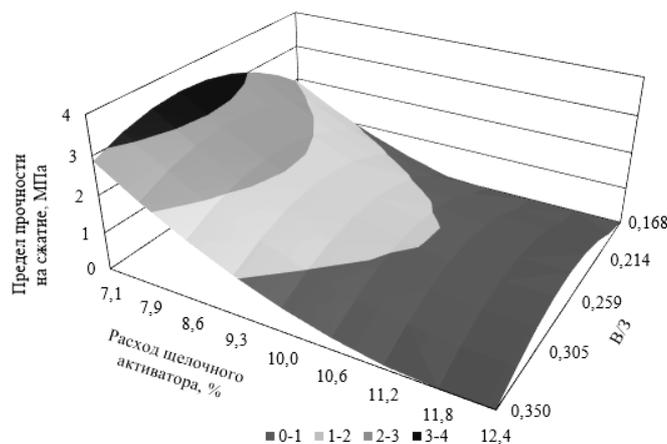


Рисунок 2. – Диаграмма предела прочности на сжатие золошлакощелочного камня при использовании в качестве активатора гидроксида натрия при $x_1 = 1 = \text{const}$

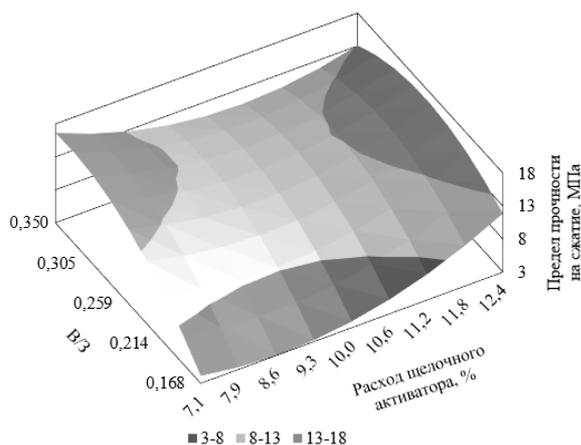


Рисунок 3. – Диаграмма предела прочности на сжатие золошлакощелочного камня при использовании в качестве активатора безводного метасиликата натрия при $x_1 = 1 = \text{const}$

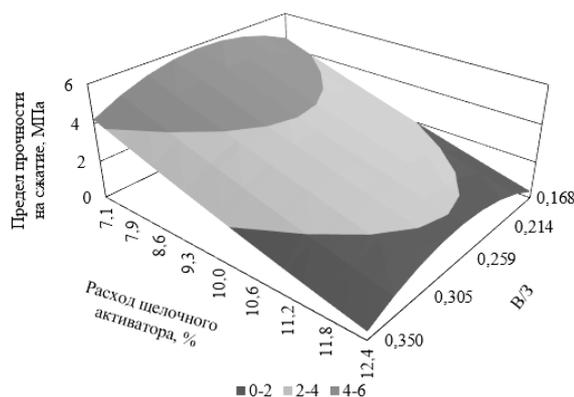


Рисунок 4. – Диаграмма предела прочности на сжатие золошлакощелочного камня при использовании в качестве активатора гидроксида калия при $x_1 = 1 = \text{const}$

Результаты расчетов предела прочности на сжатие золошлакощелочного вяжущего, полученные по математическим моделям, были экспериментально проверены при концентрации 28% и водозольном отношении 0,276, которые являются оптимальными для применяемых щелочных активаторов.

На *втором этапе* исследовалась кинетика твердения золошлакощелочного камня в возрасте 7, 14, 28, 56, 420 суток. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Кинетика твердения золошлакощелочного камня

Вид щелочного активатора	Концентрация, %	Предел прочности на сжатие, МПа, в возрасте, суток					
		1	7	14	28	56	420
NaOH	28	4,7	5,3	5,8	6,0	7,1	12,2
Na ₂ SiO ₃		21,7	21,7	21,7	23,8	24,7	33
KOH		9,0	9,0	8,9	9,0	9,1	10,7

Исследования вяжущего, полученного на основе измельченных золошлаковых отходов Белорусской ГРЭС, для активации которых использовались NaOH, Na₂SiO₃, KOH, показали, что предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня в зависимости от вида щелочного активатора на 28 сутки нормально-влажностного твердения может находиться в интервале от 6 до 24 МПа. Предел прочности

на сжатие золошлакощелочного камня при использовании в качестве активатора гидроксида калия KOH составляет 9 МПа через 24 часа и продолжает незначительно расти, увеличиваясь к 420 суткам на 18,9% до значения 10,7 МПа. При использовании в качестве активатора метасиликата натрия Na_2SiO_3 золошлакощелочной камень набирает через 24 часа 91,2% от значения предела прочности на сжатие в возрасте 28 суток; прочность продолжает активно расти и на 420 сутки твердения увеличивается на 38,7%. При использовании в качестве активатора гидроксида натрия NaOH золошлакощелочной камень набирает через 24 часа 78% от 28-суточной прочности, а на 420 сутки увеличивается в 2 раза по сравнению с пределом прочности на сжатие в возрасте 28 суток.

Таким образом, все составы золошлакощелочного вяжущего обеспечивают длительный набор прочности на сжатие золошлакощелочного камня без снижения значений, достигнутых к 28 суткам при твердении в нормально-влажностных условиях.

Об эффективности щелочных активаторов Na_2SiO_3 , KOH можно судить по значениям прочности на сжатие через 24 часа при твердении в воздушно-сухих условиях при температуре 80 °С, которая соответственно составила 91,2 и 100 % от значений прочности на сжатие в возрасте 28 суток. Более медленно золошлаковые отходы гидратируются в присутствии NaOH, набирая через 24 часа 78,3% от значений прочности на сжатие в возрасте 28 суток.

Микроструктура золошлакощелочного камня в возрасте 28 суток с различными активаторами показана на рисунке 5.

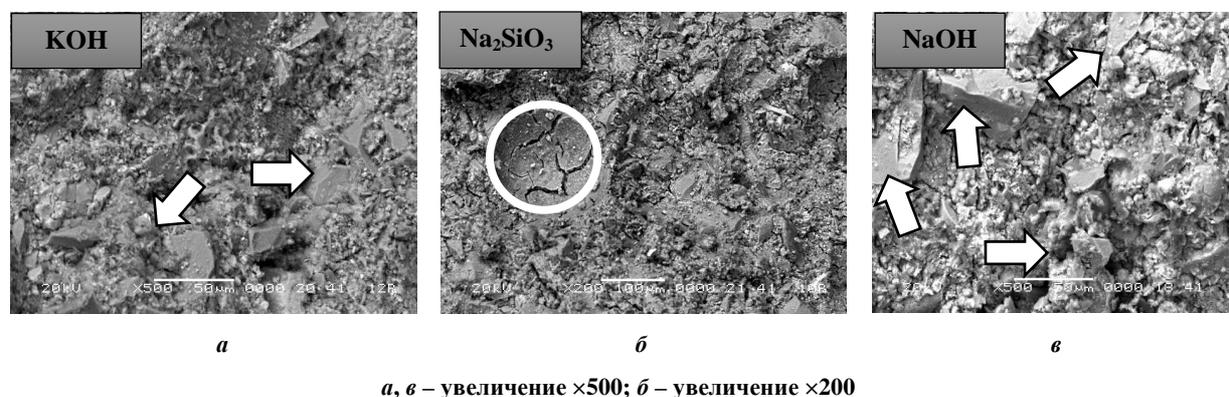


Рисунок 5. – Микроструктура золошлакощелочного камня в возрасте 28 суток с различными активаторами

Исследования микроструктуры золошлакощелочного камня в возрасте 28 суток показали:

- золошлакощелочной камень при использовании в качестве щелочного активатора Na_2SiO_3 характеризуется монолитной структурой (рисунок 5, б);
- микроструктура золошлакощелочного камня со щелочными активаторами KOH и NaOH содержит зерна непрореагировавших частиц золошлаковой смеси, которые указаны стрелками на рисунке 5 а, в.

При этом микроструктура образца со щелочным активатором NaOH характеризуется как более рыхлая, неоднородная, что подтверждают полученные данные по пределу прочности на сжатие с самым низким значением из рассматриваемых составов и продолжающимся активным набором прочности в более поздние сроки твердения.

На рисунке 5, б в микроструктуре золошлакощелочного камня видна микротрещина, наличие которой, возможно, связано с подготовкой образца к микрофотографии или с усадочными деформациями.

Заключение. С применением математического планирования эксперимента установлены интервалы значений концентрации щелочного активатора и водозольного отношения, обеспечивающие достижение максимальных значений предела прочности на сжатие. Обобщение полученных результатов показало, что для используемых в эксперименте щелочных активаторов (Na_2SiO_3 , KOH, NaOH) концентрация должна находиться в интервале значений от 27 до 35%, при этом водозольное отношение должно составлять от 0,22 до 0,28.

Экспериментально установлено, что при одинаковом режиме твердения вид щелочного активатора оказывает существенное влияние на кинетику набора прочности золошлакощелочным камнем. Использование в качестве активаторов твердения метасиликата натрия (Na_2SiO_3) и гидроксида калия (KOH) обеспечивает интенсивный набор прочности в первые 24 часа твердения в воздушно-сухих условиях при температуре 80 °С, достигая значений 21,7 и 9,0 МПа соответственно. Процесс гидратации золошлакощелочного вяжущего с метасиликатом натрия (Na_2SiO_3) продолжается и после 28 суток последующего твердения в нормально-влажностных условиях в отличие от золошлакощелочного вяжущего

с гидроксидом калия (KOH), показатели предела прочности на сжатие которого не изменились в более поздние сроки твердения.

Кинетика набора прочности золошлакощелочного вяжущего с гидроксидом натрия (NaOH) отличается замедленным набором прочности в ранний период твердения и последующим длительным набором прочности в более поздние сроки.

Так, через 24 часа твердения в воздушно-сухих условиях при температуре 80 °С предел прочности на сжатие золошлакощелочного камня с гидроксидом натрия составил 4,7 МПа, через 28 суток последующего твердения в нормально-влажностных условиях – 6,0 МПа, через 420 суток – 12,2 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошкина, Н.А. Использование золы ТЭС в технологии геополимерных строительных материалов [Электронный ресурс] / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, И.В. Коровченко // Молодой ученый. – 2015. – № 7. – С. 117–120. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/87/17049/>. – Дата доступа: 08.09.2019.
2. Корнеев, В.И. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности / В.И. Корнеев, А.С. Брыков // Цемент и его применение. – 2010. – март-апрель. – С. 51–55.
3. Ерошкина, Н.А. Принципы выбора сырьевых компонентов в технологии получения геополимеров на основе золы-уноса / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин, М.Ю. Чамурлиев // Теория. Практика. Инновации. – 2017. – № 5(17). – С. 7–16.
4. Davidovits J. Geopolymerchemistryandapplications [Электронный ресурс]/ J. Davidovits. – 3rd ed. – 2011. – Режим доступа: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/geopolymer-book-chapter1.pdf. – Дата доступа: 05.09.2019.
5. Incorporation of cement bypassflue dust infly ash and blastfurnace slag-based geopolymer / E. Mohamed Sultana [et al.] // Case Studiesin Construction Materials. – 2018. – № 8. – P. 315–322.
6. Ерошкина, Н.А. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 128 с.
7. Разуева, Е.А. Щелочная реакционная способность механоактивированной золошлаковой смеси Белорусской ГРЭС / Е.А. Разуева, Л.М. Парфенова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н.Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Ч. 2 – С. 80–83.

Поступила 03.12.2019

HARDENINGKINETICS OF ALKALI ACTIVATED ASH AND SLAG BINDER

L. PARFENOVA, K. RAZUEVA

The article presents the research results of the hardening kinetics of alkali activated ash and slag binder based on grinded ash and slag waste of the Belarusian State District Power Station. Mathematical dependences of the compressive strength of ash and slag stone have been established by variation in the composition of the binder flow of the ash and slag mixture, the flow and type of alkaline activator, and the water-ash ratio. The concentration values of alkaline activators Na_2SiO_3 , KOH, NaOH and the intervals of the water-ash ratio, which deliver of the maximum values of the compressive strength after 24 hours of hardening in air-dry conditions, are determined. The compressive strength of ash and slag stone at 7, 14, 28, 56, 420 days was pronounced. It is shown that the type of alkaline activator has a significant effect on the kinetics of the curing of ash and slag stone. Alkali activated ash and slag binder with Na_2SiO_3 and KOH are characterized by an intensive set of strength in the first 24 hours of hardening; when NaOH is used as a hardening activator, curing continues in the later hardening periods up to 420 days.

Keywords: ash and slag waste, hardening activator, ash and slag binder, hardening kinetics.

УДК 691.162

**СПОСОБ АКУСТИЧЕСКО-ЭМИССИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ВНУТРЕННЕГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ЕГО ХЛОРИДНОЙ КОРРОЗИИ**

*канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; канд. техн. наук А.Н. ЯГУБКИН;
Е.С. БОРОВКОВА; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Исследованы сигналы акустической эмиссии, возникающие в результате имитации и роста коррозионного дефекта на образце цементного камня в лабораторных условиях. Задачей исследования было выявление закономерностей излучения сигналов акустической эмиссии в зависимости от механизма хлоридной коррозии бетона. Полученные экспериментальные данные могут послужить базой для создания критерия степени опасности коррозионных повреждений на бетонных объектах различного эксплуатационного назначения.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, хлоридная коррозия, цементный камень, динамика трещинообразования.

Введение. Процессы коррозии подвержены практически все строительные конструкции под влиянием различных внешних факторов. Коррозия бетона – необратимый процесс, в ходе которого идет распад его структуры, имеет место потеря плотности и прочности, что влечет за собой утрату эксплуатационных качеств сооружения. Разрушение бетонных элементов начинается с рассыпания или расслоения цементного камня, поскольку заполнители более стойки к агрессивным воздействиям [1]. Сложность изучения процессов и причин, повлиявших на разрушение бетона, объясняется тем, что в зависимости от условий эксплуатации и срока службы конструкций одновременно действует многочисленное количество факторов, приводящих к изменениям структуры и свойств материала.

Разрушительное воздействие на бетон могут оказывать: атмосферные осадки, содержащие и образующие кислоты; хлоридсодержащие средства, в частности антиобледенители; воздух с агрессивными компонентами выхлопных газов, выбросов от промышленных предприятий, солевого тумана (характерного для приморской атмосферы); загрязненная вода из грунта, дренажных систем и стоков; ранее использовавшиеся при зимнем бетонировании добавки – ускорители твердения бетона на основе хлоридных солей. В случае если конструкция выполнена из армированного бетона, к внешним факторам добавляется еще и опасность возникновения коррозионных процессов в арматуре. Коррозия бетона делится на три вида [2]:

- 1) процессы, в результате которых растворяются составные части цементного камня;
- 2) реакции обмена, сопровождающиеся образованием рыхлых, не обладающих вяжущими свойствами продуктов, которые ослабляют структуру цементного камня и в ряде случаев могут быть вынесены из камня в процессе фильтрации агрессивной среды;
- 3) процессы, приводящие к накоплению в порах цементного камня, трещинах и капиллярах бетона солей, которые при определенных условиях могут разрушить материал.

Все три вида коррозии являются сложными многоступенчатыми процессами, включающими химическую и физико-химическую стадии.

Как показывает анализ состояния современных физических методов неразрушающего контроля, в настоящее время для диагностики процесса коррозии непосредственно на объекте в процессе его эксплуатации наиболее перспективен метод акустической эмиссии (АЭ) [3]. Данный метод заключается в обнаружении, распознавании и обработке акустических сигналов, что и является ключевым моментом в мониторинге строительных объектов. Предпосылкой излучения акустических волн является процесс коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Эффект АЭ при КРН возникает без приложения к объекту контроля дополнительной внешней испытательной нагрузки, тогда как во многих других случаях является обязательным условием, что объясняет преимущество использования этого метода. Метод АЭ позволяет проводить и непрерывный контроль (мониторинг), когда развитие дефектов происходит под воздействием рабочих нагрузок и окружающей среды. Заключение о состоянии контролируемого объекта дается на основании анализа АЭ процесса путем выявления тенденций изменения его характеристик. С помощью АЭ можно выявить не только растущие трещины, но и коррозионные процессы различного характера, такие как коррозионное растрескивание под напряжением, язвенная, щелевая и межкристаллитная коррозия [4].

Исследовательская часть. Изучению подвергались образцы из цементного камня кубической формы размером 100×100×100 мм по достижении проектного возраста 28 суток после их изготовления. Первый образец (I) находился в естественных нормально-влажностных условиях (с исключением агрес-

сивного влияния солевого воздействия на бетон); второй (II) – погруженный на 45 суток в солевой раствор (5%-ный раствор NaCl).

Цель эксперимента заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств цементного камня в агрессивной среде и взаимосвязи с сигналами АЭ в режиме одноосного деформирования.

Для достижения поставленной цели при испытаниях бетонного образца одновременно запускались две программы: одна – для регистрации параметров сигналов АЭ, другая – для регистрации механических величин. При проведении испытаний использовались установка для нагружения – пресс гидравлический ПГМ-500МГ4А, пьезодатчик для регистрации АЭ, осциллограф и компьютер.



**Рисунок 1. – Разрушенные образцы цементного камня:
при нормально-влажностных условиях (а);
с хлоридной коррозией (б) – находился в соляном растворе 45 суток**

Механизм разрушения тесно связан с энергией межатомной связи и тепловым движением атомов в цементном камне. Процесс разрушения бетона под напряжением можно разделить на стадии [5]:

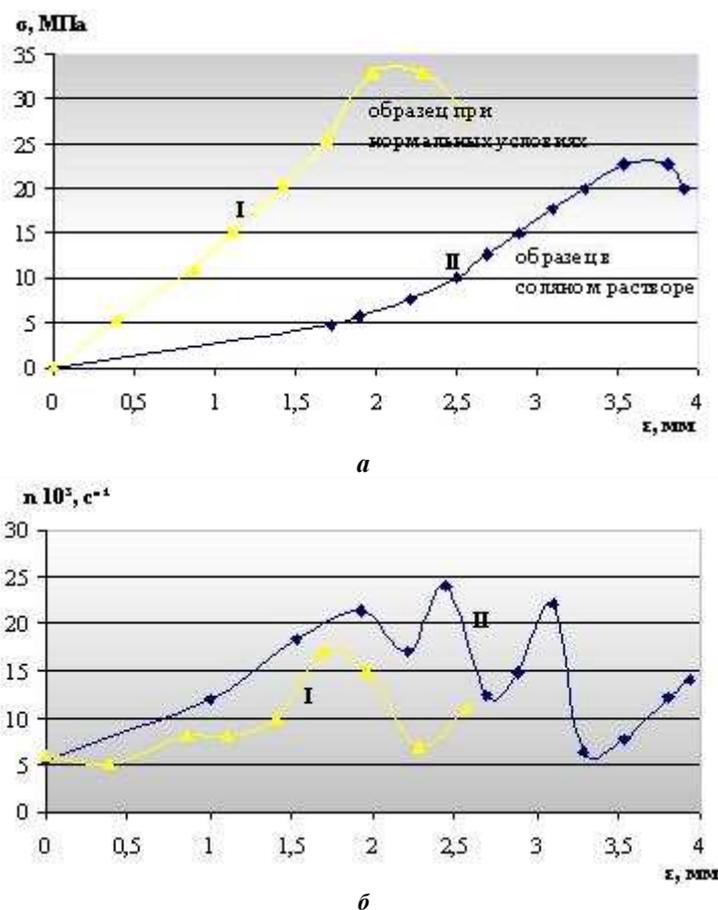
- 1) возмущение межатомных химических связей под действием механической нагрузки;
- 2) разрыв механически возбужденных связей термическими флуктуациями, создаваемыми тепловым колебательным движением;
- 3) накопление разорванных химических связей в нагруженном цементном камне, что приводит к разрыву его на части.

Образовавшиеся радикалы вследствие разрыва химических связей вступают в реакции с другими группировками структуры из-за большой химической активности первых, что является причиной образования разрушенной микрообласти, которая становится местом зарождения трещины в цементном камне. Именно тепловые флуктуации являются причиной разрыва межатомных связей, находящихся под механической нагрузкой. Концентрация разорванных связей под напряжением постепенно возрастает до момента образования и развития магистральной трещины. Приложенная к цементному камню механическая сила не разрывает связи между атомами, а только деформирует и возбуждает их. Таким образом, разрыв химических связей осуществляется термическими флуктуациями за счет энергии теплового движения [5].

При хлоридной коррозии в случае воздействия испытательных солевых растворов на образец в последнем возникают еще и дополнительные изменения. К ним можно отнести: кристаллизационное давление накопившейся соли, которая образовалась после перенасыщения ее раствором в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, в зонах контакта составляющих бетона и микротрещинах зерен заполнителя [6]; усиление процесса миграции воды и рост влагоемкости бетона, в объеме пор которого накапливается соль; возникновение напряженного состояния на уровне микроструктуры цементного камня. Ион Cl^- легко мигрирует через цементное тесто, при этом скорость диффузии зависит от соотношения Cl^-/OH^- . В цементном камне миграция ионов Cl^- происходит через области повышенной проницаемости: микротрещины, капилляры и открытые поры. Связывание ионов Cl^- и их диффузионная способность определяет интенсивность хлоридной коррозии [7].

Рост прочности образца II (рисунок 2, а), находящегося в соляной среде, на начальной стадии эксперимента обеспечивается за счет кальматации пор кристаллами соли. Вследствие этого уменьшается количество зон с нарушениями сплошности структуры материала, которые под нагрузкой создают в нем напряженное состояние, являются концентраторами напряжений и вызывают зарождение трещин под действием внешних нагрузок [5]. При возрастании напряжений до уровня нижней границы микротрещинообразования происходит уплотнение структуры бетона, что снижает скорость проникновения в материал химически агрессивных реакторов по сравнению с ненагруженным бетоном. При дальнейшем росте

напряжений цементного камня в структуре материала начинается процесс образования, накопления и развития микротрещин, структура разрыхляется, скорость проникновения агрессивных сред в структуру возрастает. Следовательно, коррозионные повреждения «расшатывают» структуру бетона. В этом случае процессы коррозионного и силового разрушения носят взаимно усиливающий характер [8].



a – зависимость напряжений σ от относительной деформации ε ;
b – зависимость активности АЭ от деформации ε

Рисунок 2. – Взаимосвязь между прочностными и АЭ характеристиками образцов цементного камня, находившегося в естественных условиях (I) и в 5%-ном растворе NaCl (II)

На начальном этапе циклических испытаний происходит накопление повреждений в области концентратора. В результате данных процессов генерируются акустико-эмиссионные сигналы, несущественно отличающиеся как по активности, так и по величине амплитуды, характерные для двух образцов (рисунок 2, б). Активность сигналов резко возрастает в момент перехода от упругой деформации к пластическому течению. Однако при дальнейшем нагружении образцов на участке деформационного упрочнения наблюдается уменьшение регистрируемых импульсов АЭ. При увеличении локального напряжения до значения, превосходящего предел прочности материала, возникает скачкообразное увеличение дефекта, т.е. микровзрыв, что также сопровождается сигналами АЭ.

Таким образом, можно сделать вывод: когда напряжение в образцах приближается к исчерпывающему ресурсу материала, начинается резкий рост числа импульсов [9].

При коррозионных испытаниях метод АЭ особенно эффективен для слежения за коррозией под напряжением. Напряжения ускоряют процесс коррозии, в образце появляются трещины, деформация усиливается. Возникновение коррозионных трещин сопровождается появлением интенсивных сигналов АЭ, значительно отличающихся от сигналов в образце, находившемся в естественных условиях. Интенсивность и амплитуда акустических сигналов на всех стадиях эксперимента значительно выше у образца, находившегося в агрессивной среде, чем у образца, не подвергнувшегося коррозионным изменениям. По этим отличительным признакам можно судить о протекании процесса без доступа к месту коррозионного повреждения [4].

Заключение. С помощью регистрации данных акустической эмиссии определена связь между акустическими сигналами и механизмом хлоридной коррозии цементного камня при его деформационном изменении. Опираясь на результаты проведенных исследований возможно использование метода акустической эмиссии в качестве сопровождения бетонных объектов, подверженных в процессе эксплуатации агрессивному воздействию среды, усиленных механических нагрузок. Данный метод может быть использован и для оценки скорости развития дефекта в целях заблаговременного прекращения эксплуатации или испытаний и предотвращения разрушения изделия, выражающегося в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении его ресурса на любой стадии эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yzgbkru.com/gazovaya-korroziya-betona>.
2. Москвин, В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. – М. : Госстройиздат, 1952. – 337 с.
3. Соколкин, А.В. Акустико-эмиссионная диагностика коррозионно-механической повреждаемости объектов из низколегированной стали : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / А.В. Соколкин. – Екатеринбург, 2003.
4. Сазонов, А.А. Выявление язвенной коррозии на промышленных трубопроводах методом акустической эмиссии / А.А. Сазонов, А.Н. Мисейко // Диагностика трубопроводов : тез. докл. 3-й междунар. конф. – М., 2001.
5. Журков, С.Н. Физические основы прочности / С.Н. Журков // Наука и человечество : междунар. ежегодник. – М. : АН СССР, 1973. – С. 177–193.
6. Ботяновский, Э.И. Влияние многократных механических нагрузок на физико-химические свойства тяжелого бетона / Э.И. Ботяновский, А.И. Бондарович // Проблемы современного бетона и железобетона, 2009. – Ч. 2 : Технология бетона. – С. 62–79.
7. Вернигорова, В.Н. Химия композиционных материалов на неорганических вяжущих / В.Н. Вернигорова, К.Н. Махамбетова, С.М. Саженко. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 163 с.
8. Пахомова, Е.Г. Прочность изгибаемых железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Г. Пахомова. – Орел, 2006.
9. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге состояния структуры бетона / Д.Н. Шабанов [и др.] // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74–78.
10. Маринин, А.Н. Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников. – Саратов : Издат. центр «РАТА», 2008. – 296 с.
11. Mezenov, V. Tough call for coating / V. Mezenov, M. Golovnenkova // Bridge: design and engineering. – 2009. – № 55. – V. 15. – 64 p.
12. Aitcin P.-C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P.-C. Aitcin // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers. – Bucharest, 2003. – June. – P. 69–88.
13. Di Maio A.A. Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments / A.A. Di Maio, L.J. Lima, L.P. Traversa // Structural Concrete. – 2004. – 5 № 1. – P. 1–4.

Поступила 05.12.2019

METHOD OF ACOUSTIC-EMISSION STUDY OF THE INTERNAL STATE OF CEMENT STONE DURING ITS CHLORIDE CORROSION

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, E. BOROVKOVA, E. TRAMBICKIJ

In the work, acoustic emission (AE) signals arising as a result of imitation and growth of a corrosion defect on a cement stone sample in laboratory conditions are investigated. The objective of the study was to identify patterns of emission of acoustic emission signals depending on the mechanism of chloride corrosion of concrete. The obtained experimental data can serve as a basis for creating a criterion for the degree of danger of corrosion damage at concrete objects for various operational purposes.

Key words: *acoustic emission, chloride corrosion, cement stone, crack formation dynamics.*

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК [624.154.04:624.156.04]:624.131.213

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ АРМОДРЕНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В ГОРОДЕ МИНСКЕ

канд. техн. наук, доц. В.А. СЕРНОВ; Т.В. ТРОНДА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Анализируется проблема, возникающая в последнее время при строительстве новых зданий и сооружений, которая выражается в том, что под строительство часто выделяются площадки с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, связанными с залеганием у поверхности слабых водонасыщенных глинистых грунтов. Уплотнение таких грунтов практически невозможно без предварительного осушения. В качестве одного из наиболее эффективных способов упрочнения водонасыщенных глинистых грунтов рассматривается устройство геомассива из вертикальных армодренирующих элементов из сухих бетонных или цементно-песчаных смесей в выштампованных скважинах. Приведены результаты исследований моделей геомассивов из забивных свай и армодренирующих элементов из песчано-цементных смесей, выполнен сравнительный анализ данных технологий, представлены зависимости коэффициента упрочнения основания от длины армирующих и армодренирующих элементов. Установлено, что применение армодренирующих элементов для усиления основания до двух раз эффективнее применения забивных свай. Рассмотрен опыт использования такой технологии для усиления основания при строительстве жилого дома в Минске.

Ключевые слова: *слабые глинистые грунты, вертикальные армодренирующие элементы, сухая бетонная смесь, улучшение свойств грунтов.*

Введение. Все чаще при строительстве новых зданий и сооружений в городе Минске и Минском районе выделяются площадки с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, связанными с залеганием у поверхности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, нередко подстилаемых мергелями, биогенными или заторфованными грунтами, мощность которых может достигать нескольких десятков метров. В таких случаях традиционно применяются свайные фундаменты, выполняется замена верхнего слоя основания грунтовой подушкой или производится уплотнение природного грунта. Однако, как показывает практика, эти способы малоэффективны в данных грунтовых условиях. Несущая способность относительно коротких, защемленных в слабых глинистых грунтах свай будет незначительна. При устройстве длинных свай-стоек, опирающихся на прочные подстилающие слои, возникает опасность развития сил отрицательного трения вдоль стволов свай, что значительно снижает их несущую способность. При изготовлении набивных свай в таких условиях потребуются дополнительные мероприятия по сохранению целостности стволов при бетонировании. Устройство грунтовых подушек будет также нецелесообразно из-за их значительной толщины, сложности производства работ в обводненных грунтах и возможности размокания подстилающего основания водами, которые будут скапливаться в подушке во время эксплуатации здания. Уплотнение большой толщи водонасыщенных глинистых грунтов тяжелыми трамбовками невозможно без предварительного их осушения. Один из эффективных способов уплотнения таких грунтов – длительное воздействие на них статической нагрузкой с одновременным их дренированием песчаными сваями. Однако этот способ применяется в основном для сооружений, передающих относительно небольшие нагрузки на основание (дорожные насыпи, резервуары и т.п.). Однако уплотняющее давление должно на 20% превышать давление на основание в период эксплуатации и, как следствие, для многоэтажных и высотных зданий применение этого метода затруднительно из-за больших объемов земляных работ при устройстве и разборке насыпей, а также длительного срока консолидации основания.

Одним из методов, позволяющих в настоящее время эффективно выполнить упрочнение большой толщи слабых водонасыщенных глинистых грунтов, служит устройство геомассива, состоящего из вертикальных армодренирующих элементов из сухих песчано-цементных или бетонных смесей, выполненных в выштампованных скважинах. Такой подход позволяет уменьшить влажность основания с последующим его уплотнением цилиндрическими и коническими пуансонами.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что до настоящего времени в строительной практике армодрирующие элементы из сухих песчано-цементных или бетонных смесей, выполненных в выштампованных скважинах, не применялись и, соответственно, отсутствуют какие-либо рекомендации и методики расчета таких конструкций. Однако идея упрочнения оснований и создания геомассивов из вибронабивных песчаных свай возникла давно. Впервые этот метод был предложен инженером Спиридоновым еще в 1851 году. Идея заключалась в вытрамбовке скважины деревянным сердечником с последующим заполнением ее песком с послойным уплотнением. В дальнейшем этот метод был усовершенствован в НИИ оснований Госстроя СССР под руководством профессора Д.Д. Баркана, который предложил вместо сердечника погружать в грунт инвентарную стальную трубу, оборудованную снизу раскрывающимся наконечником [1]. Метод глубинного уплотнения грунтов песчаными сваями широко используется и в настоящее время [2], но несмотря на его эффективность, особенно возросшую с развитием строительной техники и оборудования в последние десятилетия, этот метод не нашел дальнейшего широкого применения из-за присущих ему существенных недостатков. В период строительства песчаные сваи, являясь одновременно дренами, осушают глинистое основание и способствуют его упрочнению, но во время эксплуатации вода через дренаи может размочить глинистые грунты и привести к снижению их прочности. Именно по этой причине Н.В. Лалетин [1] рекомендовал не применять данный метод для уплотнения легко размокаемых лессовидных грунтов.

В отличие от песчаных свай, армодрирующие элементы из сухих бетонных и цементно-песчаных смесей более эффективно осушают окружающие грунты. В результате гидратации цемента прочность таких элементов значительно выше, чем прочность песчаных свай, а деформативность и водопроницаемость, соответственно, ниже. После твердения цемента эти элементы, в отличие от песчаных свай, больше не являются дренами и, как следствие, не возникает опасность размокания глинистых грунтов в период эксплуатации здания.

Впервые сухие бетонные смеси предложил применять профессор М.И. Никитенко для увеличения несущей способности набивных свай в водонасыщенных глинистых грунтах. При устройстве буронабивных свай в основании жилого дома в квартале улиц Бурдейного – Якубовского и конических выштампованных свай в основании жилого дома по улице Бельского влажность глинистых грунтов оказалась значительно выше, чем по данным инженерно-геологических изысканий. Статические испытания опытных свай показали, что их несущая способность недостаточна для восприятия проектных нагрузок. Для уменьшения влажности грунтов основания было принято решение в уровне нижних концов свай втрамбовать сухую бетонную смесь, что позволило увеличить их несущую способность примерно в 2 раза [3]. В дальнейшем подобный подход успешно применялся под руководством М.И. Никитенко для увеличения несущей способности набивных свай при строительстве жилого дома в квартале улиц Притыцкого – Бельского, православного храма во имя Архистратига Божия Михаила в микрорайоне Сухарево [4] и многоэтажного здания по улице Тимирязева [5].

Успешный опыт применения сухих бетонных смесей для создания уширенных свай в слабых водонасыщенных глинистых грунтах позволил предположить возможность улучшения свойств грунта во всей активной зоне основания здания путем устройства геомассива. Для оценки эффективности закрепления глинистых грунтов армодрирующими элементами из сухих бетонных и песчано-цементных смесей были выполнены модельные и натурные испытания фрагментов геомассива.

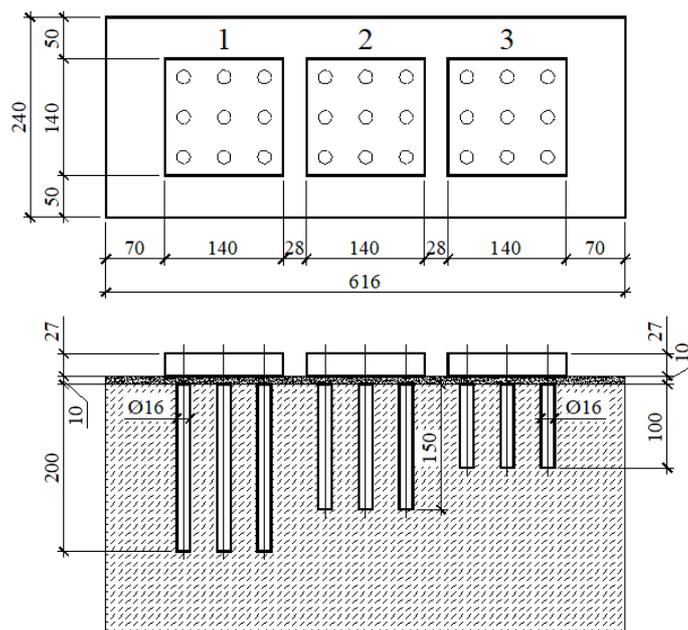
Модельные испытания

Исследования моделей геомассивов проводились в лаборатории кафедры «Геотехника и экология в строительстве». При устройстве армодрирующих элементов в выштампованных скважинах усиление основания происходит как за счет уплотнения и армирования основания, так и за счет увеличения прочности глинистого грунта в процессе его дренирования. Вопросы армирования грунтов посвящено достаточно большое количество исследований. По данной теме опубликованы работы Р.А. Мангушева [6], Л.В. Нуждина [7], А.П. Кремнева [8], С.Н. Банникова [9]. Однако процесс увеличения прочности глинистого грунта при его дренировании до настоящего времени недостаточно изучен. Цель модельных исследований – качественная оценка влияния эффектов армирования и дренирования на изменение деформационных свойств слабых глинистых оснований при устройстве армодрирующих элементов из сухой цементно-песчаной смеси.

Испытания моделей проводились в грунтовом лотке размерами 1120×240×600 мм, заполненном слабой водонасыщенной супесью со следующими характеристиками:

- влажность на границе текучести $W_L = 15,7\%$;
- влажность на границе раскатывания $W_p = 9,1\%$;
- начальная влажность $W_0 = 13,7\%$;
- число пластичности $I_p = 6,6$;
- показатель текучести $I_L = 0,70$.

Для оценки деформационных свойств основания в лотке были выполнены испытания шести штампов размерами 140×140×27 мм статической нагрузкой. После этого в местах установки первых трех штампов было выполнено упрочнение основания армирующими элементами в виде деревянных забивных свай диаметром 16 мм, длиной 100 мм, 150 и 200 мм, с шагом $a = 3d = 48$ мм. Основание остальных трех штампов было закреплено армодрирующими элементами из сухой цементно-песчаной смеси на портландцементе марки ПЦ 500 с соотношением цемента к песку по массе Ц:П = 1:9,1. Соотношение компонентов бетонной смеси бралось из расчета получения бетона класса С8/10 в стандартных условиях. Размеры армодрирующих элементов, выполненных в выштампованных скважинах, были такие же, как и размеры забивных свай на первых трех участках. Схема расположения элементов приведена на рисунке 1. Армирующие и армодрирующие элементы устанавливались с шагом $a = 3d$ в количестве 9-ти штук под каждым штампом.



модель 1 : $l_{эл} = 20$ см; модель 2: $l_{эл} = 15$ см; модель 3 : $l_{эл} = 10$ см

Рисунок 1. – Схема расположения моделей геомассива

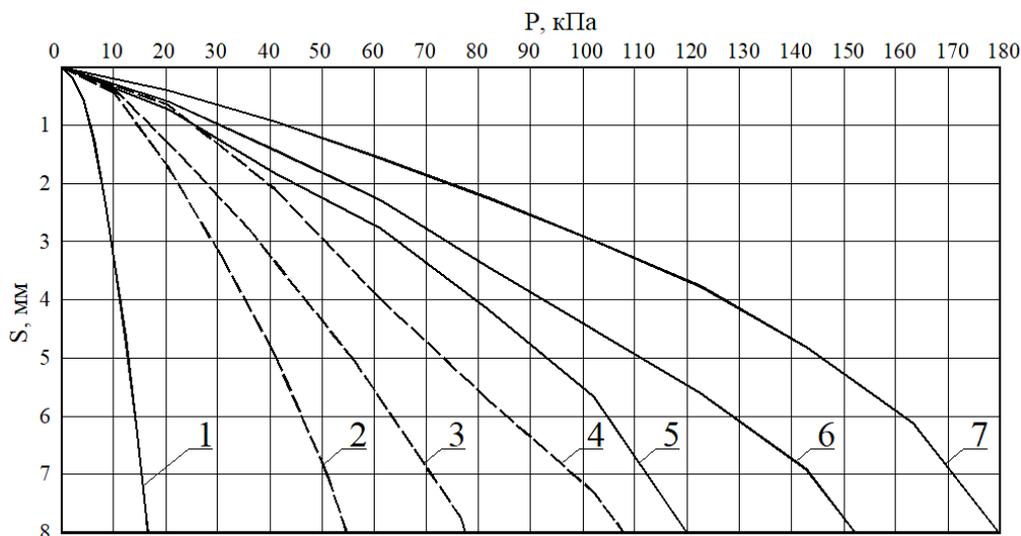
На первых трех участках армирующие элементы забивались последовательно без технологических перерывов. На остальных трех участках армодрирующие элементы выполнялись в два этапа. На первом этапе под каждым штампом было выполнено по 5 элементов (центральный и угловые). Затем по истечении трех суток были установлены оставшиеся 4 элемента. Такой подход позволяет добиться максимального эффекта уплотнения, поскольку элементы второй очереди погружались в частично дренированный грунт.

После устройства армирующих и армодрирующих элементов над ними была изготовлена распределительная песчаная подушка толщиной 10 мм из песка средней крупности с диаметром частиц менее 2 мм. В ходе проведения эксперимента применялись мероприятия по предотвращению испарения влаги и высыхания грунта.

По истечении 28 суток после устройства армодрирующих элементов и набором ими прочности были проведены штамповые испытания всех шести моделей геомассива. Нагрузка к штампам прикладывалась ступенями с шагом 0,2...0,4 кН с помощью рычага с передаточным числом 1:10. Для измерения осадок штампов на каждой из них было установлено по два индикатора часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Всего было выполнено три испытания штампом грунта, армированного забивными сваями, и три испытания грунта, армированного сухой цементно-песчаной смесью в выштампованных скважинах. При этом варьировалась длина армирующих и армодрирующих элементов соответственно 100 мм, 150 и 200 мм. Результаты испытаний отображены на рисунке 2.

Несущая способность моделей фундаментов определялась при осадке $s = 8$ мм, соответствующей осадке штампа до армирования грунта на предпоследней ступени загрузки, после которой происходит потеря устойчивости основания. Результаты испытаний показывают, что армирование грунта забивными

сваями позволяет эффективно повышать несущую способность основания. Так, при устройстве в основании штампов 9 армирующих элементов из выштампованных свай длиной 100 мм, 150 и 200 мм несущая способность основания возросла соответственно на 230%, 370 и 550%. Еще эффективнее несущая способность основания возрастает при устройстве армодренирующих элементов из сухой цементно-песчаной смеси. Изготовив такие элементы в основании оставшихся трех штампов по описанной выше технологии длиной 100 мм, 150 и 200 мм, удалось увеличить несущую способность основания соответственно на 622%, 818 и 982%.



1 – штамп; 2 – армирующие элементы $L = 100$ мм; 3 – армирующие элементы $L = 150$ мм; 4 – армирующие элементы $L = 200$ мм; 5 – армодренирующие элементы $L = 100$ мм; 6 – армодренирующие элементы $L = 150$ мм; 7 – армодренирующие элементы $L = 200$ мм

Рисунок 2. – Результаты испытаний фрагментов геомассивов, состоящих из армирующих и армодренирующих элементов

Для оценки эффективности армирования и дренирования грунта удобно пользоваться коэффициентом упрочнения $K_{упр}$, равным отношению несущих способностей закрепленного грунта и грунта в естественном состоянии. На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента упрочнения от длины свай $K_{упр} = f(L)$.

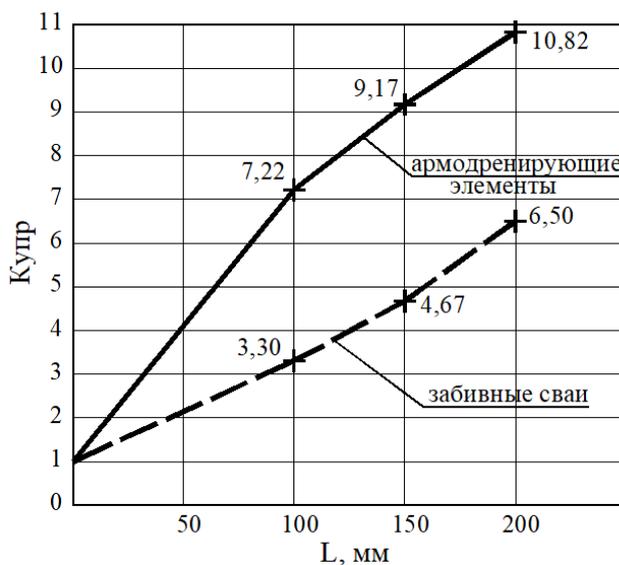


Рисунок 3. – Зависимости коэффициента упрочнения от длины элементов

Сопоставив графики зависимости $K_{\text{упр}} = f(L)$ для армирующих и армодрирующих элементов, можно заметить, что в результате армирования грунта значение $K_{\text{упр}}$ возрастает пропорционально увеличению длины свай, а эффект дренирования практически не зависит от длины элементов.

Практическое применение армодрирующих элементов

Установленная в ходе модельных исследований высокая эффективность применения армодрирующих элементов при закреплении слабых водонасыщенных оснований позволила применить подобное решение при проектировании жилого дома № 16 по улице Ложинской в жилом комплексе «Вивальди» в Минске, представляющем собой С-образное одиннадцати подъездное здание высотой 11–14 этажей (рисунок 4). Каркас здания состоит из железобетонных монолитных колонн и диафрагм жесткости с монолитными плитами перекрытия. Здание разделено температурно-деформационными швами на три секции: первая в осях 8–12 (4 подъезда), вторая в осях 5–8 (3 подъезда), третья в осях 1–5 (4 подъезда).



Рисунок 4. – Жилой дом № 16 по улице Ложинской

По данным инженерно-геологических изысканий, выполненных ООО «Геоплюс» в 2009 году (объект 216/08), в основании жилого дома № 16 по улице Ложинской в Минске залегают большие толщи слабых глинистых грунтов, в том числе с органическими включениями, мелом и мергелем общей мощностью до 33,3 м. На рисунке 5 приведены характерные инженерно-геологический разрез строительной площадки с вписанными элементами усиления основания.

В верхней части основания под почвенно-растительным слоем залегают насыпные грунты (ИГЭ-1), представленные преимущественно песками с прослоями глинистых грунтов, строительным мусором и растительными остатками. Насыпные грунты распространяются до глубины 2,1...4,9 м и подлежат замене грунтовыми подушками. Ниже расположен комплекс аллювиальных, озерных и болотных отложений, образованных переслаивающимися песками разной крупности (ИГЭ-6–14), супесями и суглинками с содержанием органических веществ до 10% (ИГЭ-2–4), а также мергелем с содержанием органических веществ до 36,6% и заторфованных грунтов с содержанием карбонатов до 25% (ИГЭ-5). Грунтовые воды, вскрытые всеми скважинами на глубинах 7,8...33,4 м, приурочены к слоям песчаных грунтов. Верховодка и воды спорадического распространения вскрыты с глубин 3,2...4,1 м, имеют сезонный характер. Осложняющими фактором при устройстве фундамента, кроме низких прочностных и деформационных свойств грунтов (ИГЭ-2, 3, 4 и 5), является также сложное геологическое строение площадки, характеризующееся значительной неоднородностью основания как в плане, так и по глубине (рисунок 5).

На стадии проектирования рассматривались несколько вариантов устройства основания: сплошное свайное поле; замена слабых грунтов в верхней части основания грунтовой подушкой; геомассив из армодрирующих элементов.

Технико-экономическое сравнение вариантов показало неэффективность применения буронабивных свай, длина которых должна была достигнуть 30...35 метров. В связи с возможностью возникновения отрицательных сил трения вдоль боковых поверхностей свай при прохождении их сквозь большие

толщи заторфованных глинистых грунтов и мергелей их расчетная несущая способность оказалась незначительна. Учитывая также большую стоимость и технологические проблемы при устройстве свай такой длины, вариант свайного поля был признан нецелесообразным в данных грунтовых условиях. Также неэффективным оказался вариант устройства грунтовой подушки, толщина которой должна быть не менее 12 м, а глубина котлована достигла бы 15 м. Кроме больших объемов земляных работ и транспортных расходов, имели место проблемы водоотведения и уплотнения подушки вибродинамическими методами на основаниях, сложенных водонасыщенными грунтами, обладающими тиксотропными свойствами. В связи с этим окончательно было принято решение о закреплении слабых грунтов в пределах сжимаемой толщи основания фундаментных плит вертикальными армодренамированными элементами из сухих бетонных смесей.

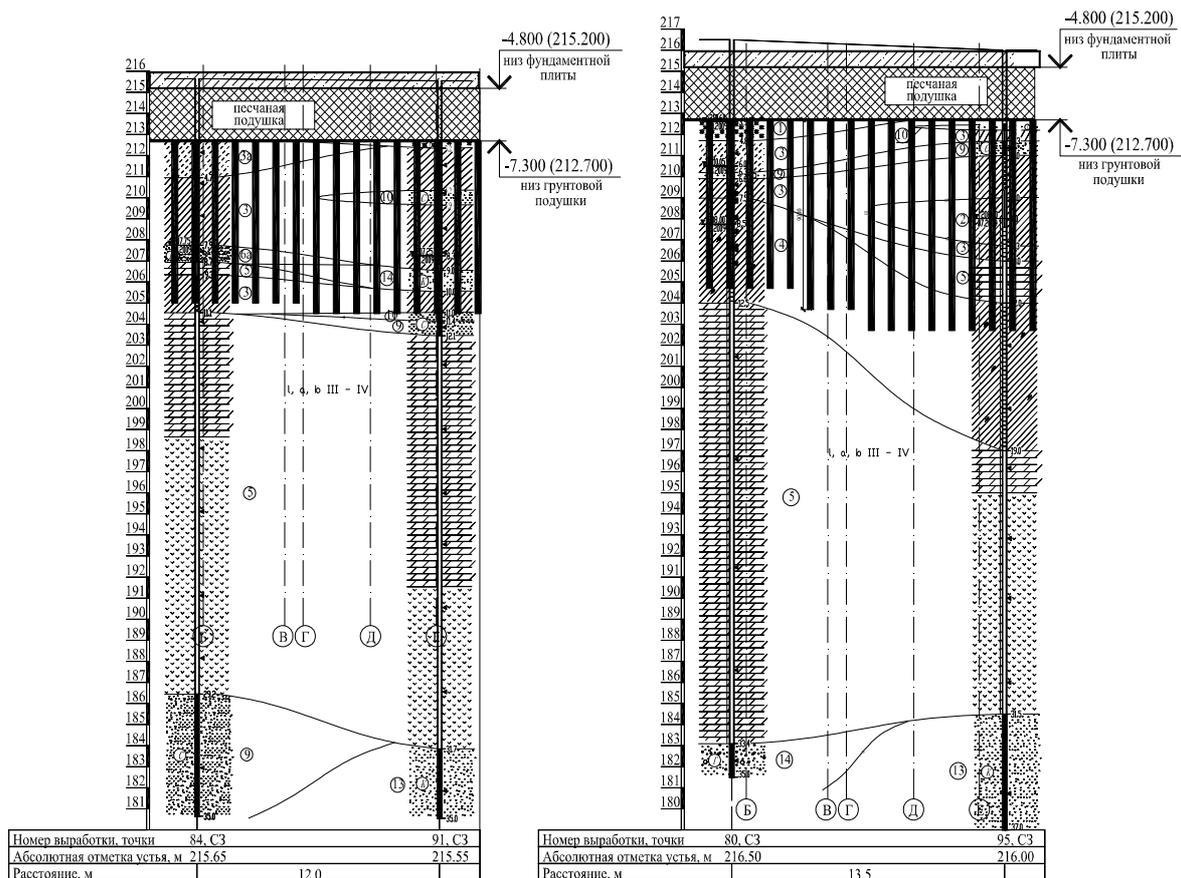


Рисунок 5. – Характерные инженерно-геологические разрезы строительной площадки со вписанными элементами геомассива

Технология изготовления цилиндрических вертикальных армодренамирующих элементов (ВАДЭ) состоит в устройстве выштампованных скважин с последующим заполнением их сухой бетонной смесью, соответствующей классу бетона С8/10. Скважина выполняется путем погружения в грунт металлической трубы диаметром 325 мм с теряемым наконечником, выполненным из листовой стали толщиной 10...12 мм. Наконечник крепится в трубе с помощью приваренных к нему скоб, выполненных из арматуры диаметром 12 мм. Погружение трубы на проектную отметку производится вибратором. После чего в трубу через воронку засыпается сухая бетонная смесь. Труба извлекается из скважины с помощью подъемного оборудования с включенным вибратором, что позволяет уплотнить бетонную смесь в скважине.

Армодренамирующие элементы выполнялись в котловане с отметки на 2,5 м ниже подошвы фундаментной плиты по сетке 1000×1000 мм. Длина ВАДЭ принималась таким образом, чтобы их нижние концы опирались на относительно прочные грунты, либо располагались глубже нижней границы сжимаемой толщи грунта в основании фундаментной плиты.

Упрочнение грунтов выполнялось как в основании фундаментной плиты, так и за ее контурами на расстоянии 4,5...6 м. После устройства ВАДЭ выше их оголовков выполнялась армированная грунтовая подушка высотой 2,5 м. С целью более эффективного рассеивания напряжений в верхней части основания грунтовая подушка армировалась горизонтальными металлическими стержнями, которые раскла-

дывались в обоих направлениях с шагом 1000 мм на трех уровнях: на глубинах 700 мм, 1300 и 1900 мм от подошвы фундаментной плиты (рисунок 6).

Строительные работы производились в 3 очереди: первая в осях 8-12 (4 подъезда); вторая – в осях 4-8 (3 подъезда); третья – в осях 1-4 (4 подъезда).

Для повышения эффективности уплотнения основания армодренирующие элементы выполнялись в две очереди – захватками «через один». Таким образом, элементы второй очереди устраивались в частично дренированном грунте через неделю после изготовления элементов первой очереди. Всего на площадке было выполнено 7009 ВАДЭ длиной от 3 до 12 метров. При наличии в основании прослоек грунтов прочных и средней прочности (ИГЭ-3, 9, 10, 14) длина ВАДЭ принималась таким образом, чтобы их нижние концы находились в этих грунтах. В противном случае длина ВАДЭ принималась не менее глубины сжимаемой толщи грунта в основании фундаментных плит здания.

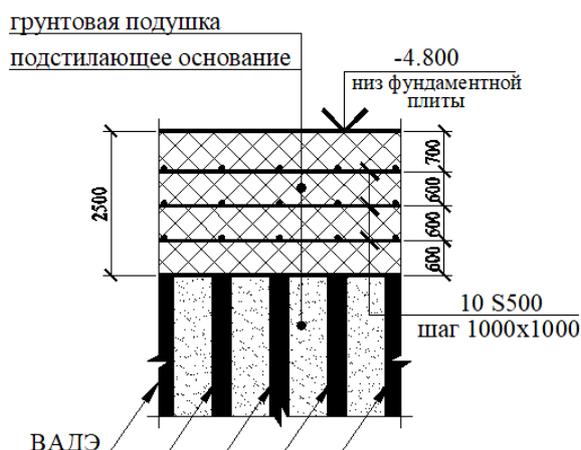


Рисунок 6. – Схема армирования основания

Поскольку подобная методика закрепления грунтов ранее не применялась в строительной практике, особое внимание уделялось натурным испытаниям фрагментов геомассивов статическими нагрузками и зондированию грунтов. После устройства армодренирующих элементов сопротивление грунта под наконечником зонда возросло в среднем на 85% [10]. По результатам испытаний фрагментов геомассивов железобетонным штампом площадью 4 м² модуль деформации закрепленного массива грунта составил не менее 34 МПа. Для наблюдения за осадками здания были установлены стеновые реперы. По данным наблюдений осадка здания не превысила 50 мм, что в 3 раза меньше допускаемых значений.

Заключение. Уплотнение сильно увлажненных и водонасыщенных глинистых грунтов невозможно выполнить без их дренирования. В связи с этим армирование таких грунтов бетонными или металлическими элементами малоэффективно, поскольку физико-механические свойства самих грунтов при этом не улучшаются. Исследования моделей геомассивов показали, что модуль деформации основания, усиленного армодренирующими элементами из сухих бетонных смесей в выштампованных скважинах, до двух раз выше, чем у оснований, армированных обычными забивными сваями. Сухая бетонная смесь, поглощая воду из окружающего грунта, позволяет ему уплотняться более эффективно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лалетин, Н.В. Основания и фундаменты / Н.В. Лалетин. – М. : Высш. школа, 1970. – 352 с.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – 2-е изд. ; под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М. : Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
3. Никитенко, М.И. Несущая способность буронабивных свай с уширениями / М.И. Никитенко, В.В. Роговенко, В.А. Сернов // Вестн. БНТУ. – Минск, 2002. – № 6. – С. 23–27.
4. Сернов, В.А. Экспериментальные исследования свайно-плитных фундаментов из коротких конических свай на строительных площадках г. Минска / В.А. Сернов // Наука и техника. – Минск, 2015. – № 2. – С. 66–72.
5. Никитенко, М.И. Некоторые проблемы свайных фундаментов в геотехнической практике Беларуси / М.И. Никитенко, В.Ю. Журавский // Строительная наука и техника. – Минск, 2008. – № 4(19). – С. 44–51.

6. Методы подготовки и устройства искусственных оснований : учеб. пособие / Р.А. Мангушев [и др.]. – М. – СПб. : Изд-в АСВ, 2012. – 280 с.
7. Нуждин, Л.В. Усиление оснований фундаментов армированием вертикальными элементами / Л.В. Нуждин, В.В. Теслицкий // Будаўніцтва – Строительство – Construction. – Минск, 2003. – № 1-2. – С. 43-47.
8. Кремнев, А.П. Методика расчета оснований, усиленных вертикально ориентированной арматурой с учетом дилатансии / А.П. Кремнев, А.Н. Поляков // Будаўніцтва – Строительство – Construction. – Минск, 2003. – № 1-2. – С. 185-189.
9. Банников, С.Н. Расчет осадок оснований и сооружений из армированного грунта / С.Н. Банников // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2013. Ч. 1. – С. 156–165.
10. Сернов, В.А. Опыт применения геомассива при строительстве жилого дома в г. Минске / В.А. Сернов, Т.В. Тронда // VII Дулатовские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф., Тараз, 29-30 марта 2012 г. / Таразский гос. ун-т им. М.Х. Дулати. – Тараз, 2012. – С. 222–224.

Поступила 04.12.2019

MODEL RESEARCHES AND PRACTICAL APPLICATION OF VERTICAL REINFORCING-DRAINING ELEMENTS FOR IMPROVEMENT OF SOFT CLAY SOILS IN MINSK

V. SERNOV, T. TRONDA

Construction sites with unfavorable geotechnical conditions associated with the occurrence of soft water-saturated clayey soils at the ground surface are often given under construction of new buildings and structures in recent years. Compaction of such soils is practically impossible without prior drainage. One of the most effective ways of strengthening water-saturated clay soils is the installation of vertical reinforcing- draining elements of dry concrete or cement-sand mixtures in stamped wells. The study results of driven pile models and reinforcing-draining elements of sand-cement mixture, the comparative analysis of these technologies, the dependence of the ground compaction coefficient on the length of reinforcing and reinforcing-draining elements are given in the article. It was found that the application of reinforcing-draining elements to strengthen the ground base is up to two times more effective than the application of driven piles. The experience of application such technology to strengthen the ground base during the construction of a residential building in Minsk is also considered in the article.

Keywords: soft clay soils, vertical reinforcing-draining elements, dry concrete, ground improvement.

УДК 658.26:536.7:666.97.035

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ
ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
СЛОЖНОЙ 3D-ГЕОМЕТРИИ В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ****А.М. НИЯКОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет);**д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНЮК**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Предложены критерии и характеристики для оценки энергоэффективности режимов тепловой обработки бетонных изделий, а также уравнения для расчёта минимально необходимого количества подводимой к изделию теплоты, обеспечивающего достижение заданной прочности в назначенное время. С использованием разработанного математического аппарата на примере выпускаемого промышленностью композитного бетонного изделия сложной геометрии выполнено сравнение различных режимов тепловой обработки в промышленной теплотехнологической установке. Установлены зависимости от времени тепловой обработки между минимально необходимой величиной теплопотребления, распределением температуры и степенью гидратации в объёме изделия для этих режимов. Показано, что разработанный численный метод позволяет решать задачи выбора режимов тепловой обработки бетонных изделий по критерию экономии тепловой энергии, сохраняя при этом качество продукции.

Ключевые слова: *математическое моделирование, теплотехнологические установки, кинетика гидратации цемента, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, композитные материалы, энергосберегающие режимы, энергоэффективность.*

Введение. Производимые в последние годы бетонные изделия промышленного изготовления отличаются сложной геометрической формой, композитной структурой и применением разнообразных материалов, имеющих различные свойства. В связи с этим отыскание оптимальных с энергетической точки зрения режимов работы теплотехнологических установок (ТТУ) для тепловой обработки (ТО) бетонных изделий традиционными методами с использованием тестовых образцов-кубиков становится неинформативным. Решение этой задачи путём проведения промышленных испытаний натуральных моделей требует много времени и влечёт значительные материальные затраты. При этом в ходе таких испытаний не удастся установить характер распределения температуры и степени гидратации в пределах внутреннего пространства изделия в течение времени его ТО.

Вопросам проектирования энергосберегающих режимов ТО бетонных изделий в ТТУ посвящено много исследований [1–4], но все они выполнены в основном в рамках строительного материаловедения и науки о бетоне. С позиций промышленной теплоэнергетики данная проблема рассмотрена, в частности, в работах [5; 6] а также в [7; 8]. Однако предложенные указанными авторами методы не могут быть использованы в отношении изделий со сложной 3D-геометрией и неоднородной многокомпонентной структурой, так как они оперируют моделями с сосредоточенными, а не распределёнными параметрами, не учитывают структуру изделий и многообразие возможных в этом случае граничных условий теплообмена. Они также не дают ответа на вопрос о величинах минимально необходимой технологической потребности в тепловой энергии, мощности её подвода к внешним границам изделия в различные периоды ТО, обеспечивающих заданный уровень прочности.

В ранее опубликованных нами работах [9–11] сформулированы и описаны теплофизическая модель с пространственно распределёнными параметрами и алгоритм расчёта, позволяющие осуществлять численные исследования процессов ТО в ТТУ, отличающиеся от известных учётом неравновесности процессов нагрева и гидратации изделия, учетом пространственно распределённого источника тепловыделений и пространственного распределения 3D-компонентов изделия, составляющих его композитную структуру, а также системой начальных и граничных условий, отражающих особенности теплопереноса в оборудовании ускоренной гидратации с программируемым нагревателем.

Цель представляемой работы состоит в проведении сравнительного численного моделирования различных режимов работы теплотехнологического оборудования для проведения ТО бетонных изделий, разработке критериев и математического аппарата, позволяющих производить оценку и выбор энергоэффективных режимов работы ТТУ для ТО композитных бетонных изделий сложной пространственной геометрии при обеспечении заданной прочности бетона в любой точке бетонного тела в течение назначенного времени обработки.

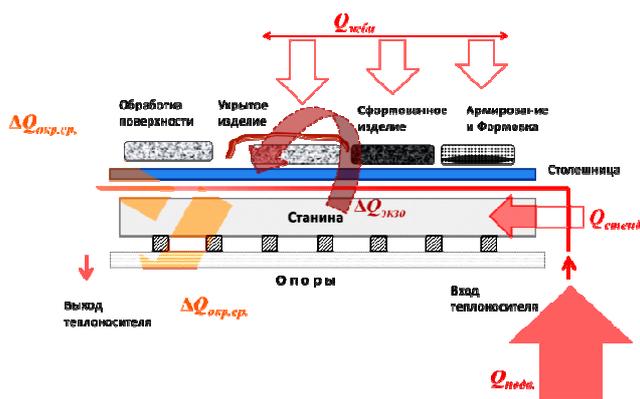
Объект, предмет, методология и задачи исследования. В качестве объекта для проведения исследования выбрана наружная трёхслойная стеновая панель серии 90, производимая на Заводе КПД ОАО «Трест № 16, г. Новополоцк» с использованием в качестве теплотехнологической установки обогреваемого стенда горизонтального формования финской компании «Elematic Oy Ab» (рисунок 1, а).

Предмет исследования – распределение температур и степени гидратации цемента внутри пространственного объёма обрабатываемого изделия и тепловые потоки на его внешних границах. Исследование основывается на методах численного анализа с использованием нестационарного уравнения теплопроводности и граничных условий в постановке, описанной в ранее опубликованных работах [12–16], учитывающей неоднородность структуры изделия и особенности организации его ТО.

Стенд для горизонтального формования применительно к рассматриваемой проблеме служит теплотехнологической установкой и представляет собой обогреваемую за счёт внешнего подвода теплоты стальную столешницу. В качестве теплоносителя используется горячая вода. После формовки изделие оставляется на столе для проведения ТО вплоть до момента приобретения распалубочной прочности. Поверх него настилается рулонное теплоизолярующее покрытие. Обобщённая условная схема тепловых потоков, иллюстрирующая статьи теплового баланса при ТО бетонных изделий на плоском горизонтальном стенде, представлена на рисунке 1, б.



а



б

Рисунок 1. – Стенд для горизонтального формования и тепловой обработки плоскостных бетонных изделий «Elematic Oy Ab» (а) и слагаемые теплового баланса (б) на различных стадиях обработки изделия (показаны условно)

Содержание и результаты исследования. Согласно схеме, изображённой на рисунке 1, к стенду вместе с теплоносителем поступает теплота $Q_{\text{подв}}$, которая с учётом теплоты экзотермически протекающей реакции гидратации бетона $\Delta Q_{\text{экзо}}$ расходуется на разогрев железобетонного изделия ($Q_{\text{жби}}$), стенда и опалубки ($Q_{\text{стенд}}$), а также на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду ($\Delta Q_{\text{окр.ср}}$).

Не вся теплота, подводимая к ТТУ в процессе ТО, полезно усваивается бетонным изделием. Теоретически можно организовать процесс, в котором на ТО конкретного вида бетонного изделия при заданных условиях теплообмена расходуется подводимое извне количество теплоты, равное некоторому технологическому минимуму, обеспечивающему при выбранной продолжительности ТО назначенную прочность бетона. Такому технологическому минимуму соответствует некоторая величина Q_{src} , характеризующая интегральные энергозатраты источника теплоты в ТТУ на ТО бетонного изделия за всё время её осуществления. Эта энергетическая характеристика отражает совокупные затраты тепловой энергии на осуществление различных элементов технологического процесса, связанных с нагревом опалубки, бетонного тела, компонентов конструкции изделия, а также энергозатраты, обусловленные рассеянием теплоты в процессе ТО в окружающую среду. Для конкретного бетонного изделия, подвергаемого ТО в ТТУ определённого типа, Q_{src} является технологической константой.

С учётом ранее описанной модели и полученного математического аппарата для численного исследования процессов нагрева и гидратации бетонных изделий в теплотехнологических установках [10; 11; 15] она может быть выражена следующим образом:

$$Q_{\text{src}}(t_N) = \sum_{\tau=0, \Delta\tau}^{t_N} \sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_4 \\ (x, y+\Delta y, z) \in \Omega_2}} \alpha_w \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x, y, z, \tau) - T(x, y+\Delta y, z, \tau)), \quad (1)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к греющей поверхности устройства ускоренной гидратации, Вт/(°C · м²); τ – время, принимающее дискретные значения от 0 до t_N (N – номер рассматриваемого такта моделирования, соответствующий моменту времени $t_N = N \cdot \Delta\tau$), с; $\Delta\tau$ – шаг дискретизации по времени, с; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально), м; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаги дискретизации по пространству, м; $T(x, y, z, \tau)$ – температура внутри изделия в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ , °C; Ω_2 – пространственная область точек опалубки; Ω_4 – пространственная область точек нагревателя.

Отношение Q_{src} к фактической величине потребления теплоты на цели ТО изделия $Q_{подв}$ можно рассматривать в качестве *характеристики энергоэффективности организации процесса ТО*:

$$K_{т.с.} = \frac{Q_{src}}{Q_{подв}} \leq 1, \quad (2)$$

где Q_{src} – величина технологически необходимого минимума теплового потребления, Дж; $Q_{подв}$ – величина фактического потребления теплоты на работу ТТУ в расчёте на одно бетонное изделие, Дж, причём всегда $Q_{src} < Q_{подв}$.

Значения, которые принимает данный коэффициент $K_{т.с.}$, лежат в пределах $0 \dots 1$, к тому же чем ближе этот показатель к величине $K_{т.с.} = 1$, тем выше качество организации процесса ТО в рассматриваемых условиях для данного типа изделия в данной ТТУ с энергетической точки зрения.

Таким образом, задаваясь различными температурно-временными режимами работы ТТУ и вычисляя для каждого из них величину Q_{src} , можно ранжировать режимы ТО по критерию энергетической эффективности.

С этой целью было выполнено сравнительное моделирование двух режимов ТО рассматриваемого изделия: с изотермической выдержкой (при контролируемом подводе теплоты и постоянной температуре нагревателя) и энергосберегающего, когда ТО изделия осуществляется главным образом за счёт теплоты гидратации, а подвод теплоты извне имеет место только в начальном периоде нагрева на этапе подъёма температуры. Режим с изотермической выдержкой характеризовался следующими параметрами: $T_{max} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура в пространственной области нагревателей в период выдержки), $\tau = \tau_{inc} = 3$ часа (момент времени завершения этапа подъёма температуры, считая от начала ТО), $\tau = \tau_{iso} = 10$ часов (момент времени завершения изотермической выдержки, считая от начала ТО).

В качестве альтернативного был использован тепловой режим с температурой, до которой осуществляется нагрев изделия, равной $T_{max} = 53 \text{ }^\circ\text{C}$, и продолжительностью периода подъёма температуры τ_{inc} , составляющей 3 часа. Продолжительность изотермической выдержки при этом принята равной $\tau_{iso} = \tau_{inc}$. В интервале времени предварительного нагрева $0 \leq \tau \leq 3$ часов оба рассматриваемых режима идентичны. В момент времени $\tau = \tau_{inc}$ нагреватели отключены, тепловая обработка осуществляется за счёт теплоты реакции гидратации.

На основании уравнения (1) с использованием теплофизической модели и математического аппарата, сформулированных в [13–15], выполнены расчёты подведённой извне тепловой энергии от нагревателя (Q_{src}) в зависимости от времени ТО. На рисунке 2 показано изменение этой величины по мере течения времени тепловой обработки.

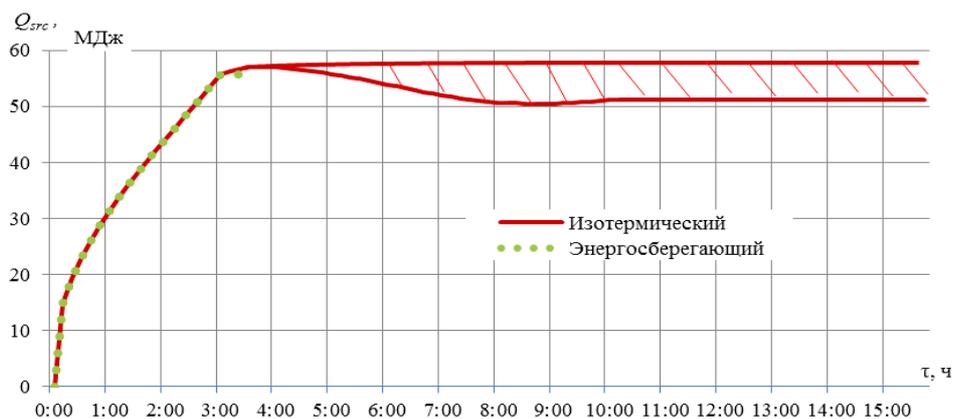


Рисунок 2. – Сравнение необходимого технологического минимума теплопотребления при изотермическом и энергосберегающем режимах тепловой обработки изделия

Как видно из рисунка 2, изотермический режим оказывается более энергозатратным (57,1 МДж) по сравнению с рассмотренным энергосберегающим (~55,7 МДж). Следует отметить, что в процессе изотермической выдержки, когда температура бетона начинает превышать температуру в области нагревателей и греющей среды, некоторая часть теплоты (~7 МДж) забирается теплоносителем из области протекания реакции гидратации и рассеивается (кривая $Q_{src}(\tau)$ на рисунке опускается от 57,1 при $\tau = 4$ часа до 50,1 МДж при $\tau = 9$ часов).

Величина технологического минимума теплопотребления Q_{src} является индивидуальной характеристикой каждого вида и типа бетонного изделия и варианта организации его тепловой обработки. Из её определения следует, что в пределах заданной продолжительности обработки в каждой точке простран-

ва изделия прочность должна достигнуть назначенного значения. Поэтому уравнение (1) необходимо рассматривать совместно с системой уравнений и граничных условий, определяющих распределение температуры и степени гидратации внутри изделия. Для численного расчёта этих распределений также использована методика, разработанная и опубликованная в [13–15].

На рисунках 3–5 показаны графики изменения во времени коэффициента гидратации в изделии в пределах нижнего и верхнего слоев бетона.

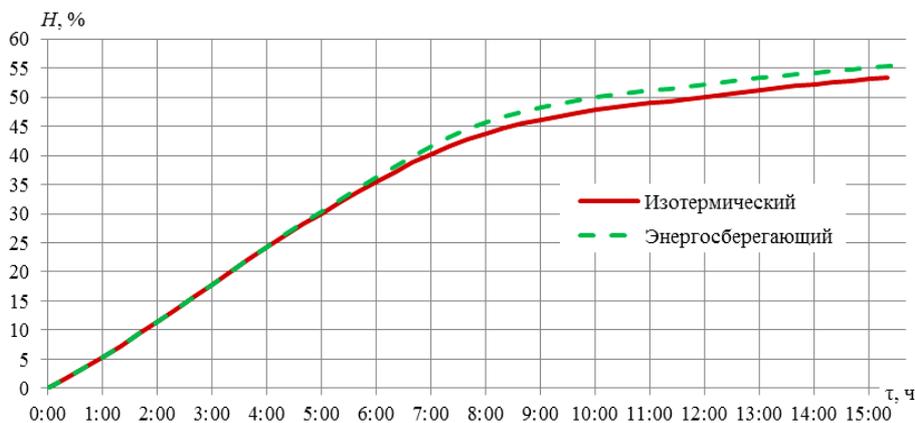


Рисунок 3. – Сравнительный анализ изменения коэффициента гидратации на нижней грани нижнего слоя бетона при тепловой обработке

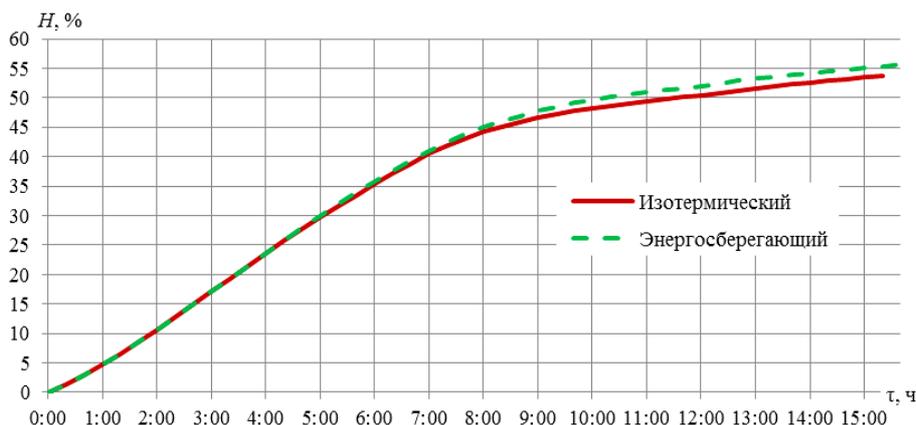


Рисунок 4. – Сравнительный анализ изменения коэффициента гидратации на верхней грани нижнего слоя бетона при тепловой обработке

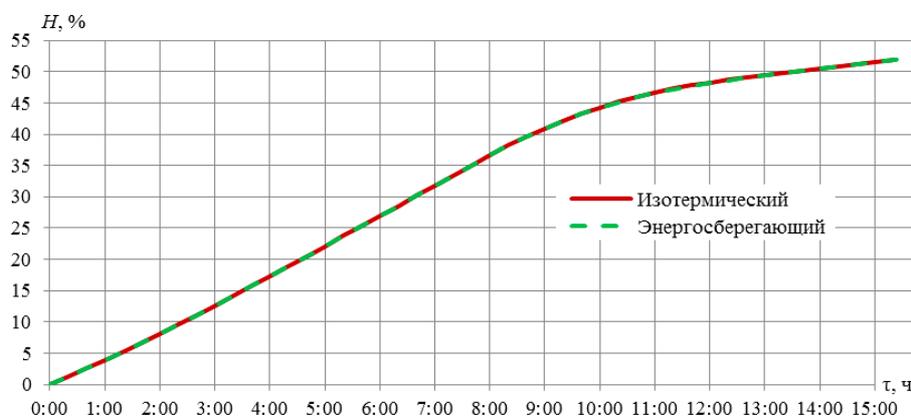


Рисунок 5. – Сравнительный анализ изменений коэффициента гидратации на верхней грани верхнего слоя бетона при тепловой обработке

Из приведённых графиков следует, что степень гидратации бетона в нижнем слое для энергосберегающего режима на момент времени $\tau = 15$ часов оказывается более 55%. Это на ~2% лучше, чем при

изотермическом режиме. Степень гидратации бетона в верхнем слое для обоих режимов практически совпадает, достигая ~52 % к концу цикла ТО. Таким образом, установлено, что найденная величина технологического минимума теплотребления обеспечивает заданное значение прочности изделия, которое должно быть достигнуто в процессе ТО.

Из анализа данных рисунка 2 следует вывод, что рассмотренный энергосберегающий режим ТО с энергетической точки зрения является более экономным по сравнению с применяемым в условиях реального производства режимом, обеспечивая снижение потребления тепловой энергии на 1,4 МДж в расчёте на одно исследуемое здесь промышленное изделие. Достигается это за счёт более полного усвоения теплоты гидратации.

По проектным данным фирмы «Elematic Oy Ab» (Финляндия) – изготовителя теплотехнологического оборудования, на котором выполнялись промышленные исследования, расчётные затраты тепловой энергии на изготовление одной трёхслойной стеновой панели серии 90 составляют $Q_{\text{подв.}} = 186$ МДж и включают помимо технологически необходимой для проведения ТО теплоты расходы теплоты на нагрев оборудования после простоя, поддержание его в горячем резерве в период технологических ожиданий (формовка, заглаживание), предварительную выдержку. Большая часть составляющих этих затрат связана с организацией и подготовкой процессов формовки и ТО.

С учётом полученных выше результатов для рассматриваемых типа ТТУ и вида бетонного изделия численное значение характеристики энергоэффективности организации процесса ТО, вычисляемое в соответствии с уравнением (2), составит

$$K_{\text{т.с.}} = \frac{Q_{\text{src}}}{Q_{\text{подв.}}} = \frac{55,7 \text{ МДж}}{186 \text{ МДж}} = 0,2995. \quad (3)$$

Таким образом, на технологические цели, непосредственно связанные с ТО данного вида бетонного изделия в данном ТТУ, полезно расходуется только около 30% ТЭ. Остальные 70% приходятся на затраты, прямо не относящиеся к обеспечению ускоренной гидратации бетона, и должны быть минимизированы организационными мерами, такими как сокращение времени простоя оборудования, этапов формовки и заглаживания изделий, полной загрузкой ТТУ.

Выводы

1. Сформулировано понятие технологического минимума потребления тепловой энергии, обеспечивающего при заданной продолжительности ТО назначенную прочность бетона; предложен математический аппарат для вычисления этой энергетической характеристики.

2. Предложен численный критерий для оценки энергоэффективности организации процесса ТО бетонных изделий.

3. Выполнено сравнение двух режимов работы ТТУ в процессе проведения ТО, в результате которого показано, что использование разработанного метода позволяет осуществлять ранжирование режимов работы ТТУ для проведения ускоренной гидратации бетонных изделий по критерию затрат тепловой энергии.

4. Описанный метод позволяет осуществлять проектирование режимов ТО бетонных изделий, имеющих сложную структуру и геометрию, на стадии их проектирования и постановки в производство при минимальных затратах времени и материальных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкин, Л.И. Критерий рационального использования тепловой энергии в производстве бетона и железобетонных изделий / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин // Технология бетонов. – 2014. – № 2. – С. 32–35.
2. Батяновский, Э.И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э.И. Батяновский, Е.И. Иванова, Р.Ф. Осос // Строительная наука и техника : науч.-техн. журн. – Минск, 2006. – № 3(6). – С. 7–17.
3. Бирик, М.С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 55–59.
4. Бирик, М.С. Расчет энергосберегающих режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М.С. Бирик, В.В. Бабицкий // Керамика: наука и жизнь. – 2009. – № 3. – С. 17–26.
5. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново : ПресСто, 2010. – 363 с.
6. Аксенчик, К.В. Исследование тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловой обработке / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 63–67.

7. Modelling of heat of hydration for thick concrete constructions – a note / Bennet Kuriakose [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 42, No. 4, October – November. – P. 348–357.
8. Ge, Zh. Predicting temperature and strength development of the field concrete : Retrospective Theses and Dissertations [Electronic resource] / Zhi Ge // Iowa State University. – 2005. – Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rtd>. – Date of access: 14.12.2018.
9. Нияковский, А.М. Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трёхмерного уравнения теплопроводности / А.М. Нияковский // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 72–79.
10. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования для производства бетонных изделий на основе численного моделирования нестационарных процессов / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 177–191.
11. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 137–145.
12. Дискретная оптимизация программно-управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 280–292.
13. Нияковский, А.М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А.М. Нияковский, Ю.В. Яцкевич, А.Н. Чичко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. Информационные технологии. – 2019. – № 4. – С. 50–61.
14. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А.М. Нияковский [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 2019. – № 3 (723). – С. 86–100.
15. Метод расчёта эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 307–324.
16. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А.М. Нияковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 4. – С. 496–505.

Поступила 10.09.2019

**ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT TREATMENT
MODES OF COMPOSITE CONCRETE PRODUCTS OF COMPLEX 3D-GEOMETRY
IN THERMAL TECHNICAL INSTALLATIONS**

A. NIYAKOVSKI, V. ROMANIUK

The criteria and characteristics for assessing the energy efficiency of the modes of heat treatment of concrete products, as well as equations for calculating the minimum required amount of heat supplied to the product, ensuring the achievement of a given strength at the appointed time, are proposed. With the use of the developed mathematical apparatus on the example of a composite concrete product of complex geometry, which is produced by industry, a comparison of different modes of heat treatment in an industrial heat-technological installation is performed. As a result of the calculations performed for these modes, the relationship between the minimum required value of heat consumption, the temperature distribution and the degree of hydration in the volume of the product depending on the time of heat treatment is established. It is shown that the developed numerical method allows to solve the problem of choosing the modes of heat treatment of concrete products according to the criterion of saving thermal energy while maintaining the quality of products.

Keywords: *mathematical modelling, thermal technical installations, the kinetics of cement hydration, temperature field, transient heat conductivity equation, composite materials, energy-saving modes, energy efficiency.*

УДК 691

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОПОРНОГО СЕЧЕНИЯ

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

Представлена методика проведения экспериментальных исследований, испытательная установка. Рассматривается композитная неметаллическая арматура и возможность ее применения совместно со стальной (гибридное армирование) в изгибаемых железобетонных элементах. Показаны основные недостатки композитных арматурных стержней, препятствующие широкому внедрению композитного армирования в строительной отрасли. По результатам анализа исследований в этой области даны предпосылки применения указанного вида армирования без применения предварительного напряжения, в том числе в неразрезных железобетонных балках. Представленная методика сосредоточена на подтверждении возможности и эффективности применения гибридного армирования в неразрезных железобетонных балках в растянутой зоне опорного сечения, а также проверке теории расчета таких элементов, для чего разработана программа экспериментальных исследований. Даны характеристики и конструкции опытных образцов балок, методика определения физико-механических свойств используемых материалов, особенности изготовления опытных конструкций. Для натурного эксперимента были изготовлены образцы железобетонных балок с применением гибридного армирования.

Ключевые слова: композитная арматура, неразрезные балки, гибридное армирование.

Введение. В настоящее время в зарубежной и отечественной строительной отрасли все большее применение находит неметаллическая композитная арматура. Интерес к неметаллической арматуре возник еще в середине XX века, и был связан, в первую очередь, с расширением области применения железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых в сильно агрессивных средах, где достаточно трудно обеспечить надежную коррозионную защиту металлической арматуре, или в конструкциях, где необходимо обеспечить нейтральные магнитные и диэлектрические свойства.

Композитная арматура (международное обозначение FRP – fiber reinforced polymer composite) представляет собой полимерный элемент, армированный высокопрочными волокнами (исходным материалом для волокна служит стекло, углерод, базальт либо арамид) [1 – 3].

В сравнении с металлической, композитная арматура (в независимости от типа применяемого волокна) обладает следующими положительными свойствами: не подвержена коррозии, устойчива ко многим химическим воздействиям, является диэлектриком, имеет меньший удельный вес, высокую прочность при растяжении. К отрицательным свойствам, которые в первую очередь препятствуют широкому внедрению композитной арматуры взамен стальной, следует отнести низкие огнестойкость, щелочестойкость, достаточно низкий модуль упругости, а также высокую стоимость.

Следует отметить, что именно низкий модуль упругости не дает возможности использовать ненапрягаемую композитную арматуру в качестве рабочей в железобетонных изгибаемых элементах. Исследования вопроса применения композитной арматуры в таких конструкциях без предварительного напряжения показывают, что, после образования нормальных трещин в работе элемента практически полностью отсутствует участок пластического деформирования и разрушение такого элемента происходит по бетону сжатой зоны [4 – 6]. Очевидно, что доминирующим фактором при определении прочности по нормальным сечениям изгибаемого железобетонного элемента, армированного в растянутой зоне исключительно композитными арматурными стержнями без предварительного напряжения, является не прочность композитной арматуры при растяжении, а ее модуль упругости. Таким образом, применение композитной арматуры в изгибаемых элементах без предварительного напряжения на сегодняшний день ограничено.

Ситуация может быть улучшена введением в растянутую зону железобетонного элемента, армированного композитной арматурой, некоторого процента металлической арматуры (гибридное армирование), тем самым достигнув более рациональной и безопасной работы конструкции в целом. Данное суждение подтверждено результатами работы под руководством профессора В.В. Тура [7], в которой показано целесообразное использование композитной арматуры (в данном случае стеклопластиковой) совместно со стальной без предварительного напряжения. Авторами [7] получена пластическая форма разрушения опытных образцов. При этом особое внимание обращено на тот факт, что ветвь пластического деформирования элемента с гибридным армированием оказалась практически в 2 раза протяженнее, чем для элементов, армированных только металлической арматурой, эквивалентной по прочности.

Анализ результатов работы [7] дает возможность предположить, что даже небольшой процент композитной арматуры, которая будет работать в упругой стадии совместно со стальной, может оказать положительный эффект в работе неразрезных железобетонных балок, достижение которого возможно с точки зрения более эффективного перераспределения внутренних усилий. Для проверки эффективности и возможности применения гибридного армирования в растянутой зоне опорного сечения неразрезных балок, а также экспериментальной проверки теории расчета прочности таких элементов разработана методика экспериментальных исследований.

Характеристики опытных образцов неразрезных балок с гибридным армированием. Проверочные экспериментальные исследования будут проведены на опытных образцах, представляющих собой железобетонные балки прямоугольного поперечного сечения шириной 120 мм, высотой 190 мм и длиной 4000 мм. Варьируемым параметром является количество гибридного армирования в растянутой зоне опорного сечения. Программа исследований составлена таким образом, что принятое суммарное количество армирования сечения исследуемой опорной зоны оценивалось механическим индексом армирования

$$\omega \left(\omega = \frac{f_{yk} \rho_{st} + f_{pk} \rho_p}{f_{cm}} \right), f_{cm} = 25 \text{ МПа},$$

который обеспечивает достижение примерно равного значения предельного изгибающего момента при прогнозируемом разрушении балок по нормальным сечениям.

Для проведения экспериментальных исследований были запроектированы 4 опытных образца неразрезных двухпролетных (пролет 1800 мм) балок с гибридным армированием растянутой зоны опорного сечения, а также два эталонных образца с полностью металлической и полностью композитной арматурой в опорном сечении. Характеристики опытных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристика опытных образцов

Обозначения балок	Размеры поперечного сечения, мм	Армирование опорной зоны	Площадь арматуры, мм ²		Коэффициент армирования, %		ω
			A_{st}	A_p	ρ_{st}	ρ_p	
БЭ1	120×190	2Ø12 S500	226	–	0,99	–	19,8
БЭ2		2Ø10 FRP	–	133,34	–	0,58	28,9
Б3		2Ø10 S500, Ø8FRP	157	40	0,69	0,175	21,29
Б4		2Ø8 S500, Ø10FRP	101	66,67	0,44	0,29	23,25
Б5		2Ø6 S500, Ø12FRP	57	94,34	0,25	0,41	25,73
Б6		2Ø6 S500, 2Ø10FRP	57	133,34	0,25	0,58	33,9

В качестве продольного армирования растянутой зоны пролетных сечений всех опытных образцов выбрана стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм класса S500 (выбор эквивалентного по прочности количества арматуры в опорном и пролетном сечении обусловлен тем, чтобы получить перераспределение усилий за счет деформаций арматуры, т.е. значительным ослаблением растянутой зоны опорного сечения), для поперечного армирования – вязанные замкнутые хомуты из арматурной стали диаметром 6 мм класса S500. Для продольного армирования растянутой зоны центрального опорного сечения образцов балок принято гибридное армирование: в качестве стальной арматуры используются стержни периодического профиля диаметром 6, 8, 10 и 12 мм класса S500, в качестве композитного армирования – стержневая стеклопластиковая арматура периодического профиля диаметром 8, 10 и 12 мм производства ЧТУП «Минпласт». Армирование образцов принято пространственными вязанными каркасами, выбор которых обуславливается исключением влияния на сопротивление изгибу таких факторов, как ослабление сечения продольной арматуры при ее сварке, исключение влияния приваренных поперечных стержней на сцепление продольной арматуры с бетоном. Шаг поперечных стержней запроектирован таким образом, чтобы предотвратить разрушение образцов балок по наклонным сечениям от перерезывающих сил. Спецификация арматурных изделий представлена в таблице 2, конструкция экспериментальных балок и схема армирования показана на рисунке 1.

Таблица 2. – Спецификация арматурных изделий

Поз.	Наименование	Кол-во, шт.	Поз.	Наименование	Кол-во, шт.
1	2	3	4	5	6
КП1 БЭ1			КП1 Б5		
1	Ø6 S500 L = 500	41	1	Ø6 S500 L = 500	41
2	Ø12 S500 L = 3950	4	2	Ø12 S500 L = 3950	2

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
КП1 БЭ2			7	Ø12 FRP L = 3950	1
1	Ø6 S500 L = 500	41	8	Ø6 S500 L = 3950	2
2	Ø12 S500 L = 3950	2	КП1 Б6		
3	Ø10 FRP L = 3950	2	1	Ø6 S500 L = 500	41
КП1 Б3			2	Ø12 S500 L = 3950	2
1	Ø6 S500 L = 500	41	3	Ø10 FRP L = 3950	2
2	Ø12 S500 L = 3950	2	8	Ø6 S500 L = 3950	2
4	Ø8 S500 L = 3950	2			
3	Ø10 FRP L = 3950	1			
КП1 Б4					
1	Ø6 S500 L = 500	41			
2	Ø12 S500 L = 3950	2			
5	Ø8 FRP L = 3950	1			
6	Ø10 S500 L = 3950	2			

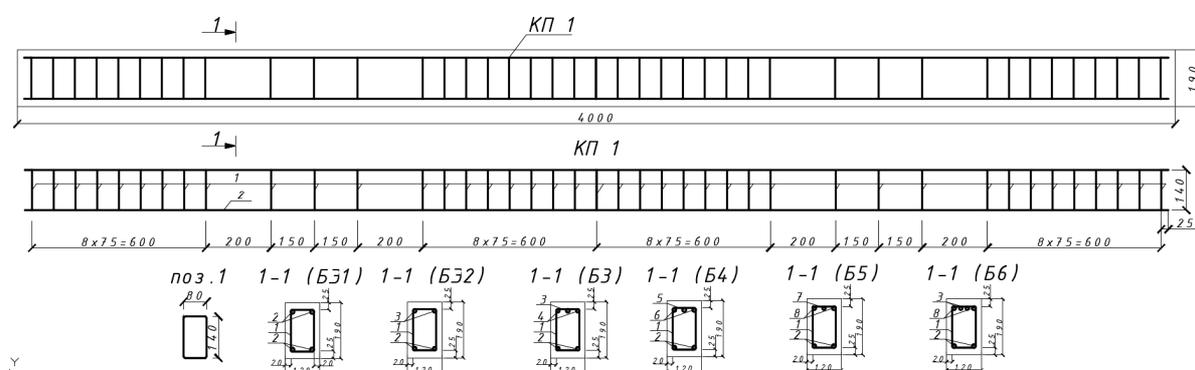


Рисунок 1. – Конструкция и схема армирования образцов-балок

С целью определения физико-механических характеристик продольной и поперечной арматуры опытных образцов-балок были отобраны отрезки арматуры из тех же партий, которые использовались для изготовления арматурных каркасов. Площадь поперечного сечения определялась путем взвешивания и измерением длины образцов. Для определения относительных деформаций образцов при растяжении применялись индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 100 мм. Образцы арматурной стали испытаны согласно [8].

Испытания по определению физико-механических характеристик стеклопластиковой арматуры проведены согласно ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик» на отрезках арматуры, отобранных из тех же партий, которые использовались при изготовлении каркасов. Результаты исследований представлены в публикации [9].

Определение физико-механических характеристик бетона будет проведено непосредственно перед исследованием опытных балок на образцах призм и кубах размерами 100 × 100 × 400 мм и 100 × 100 × 100 мм, соответственно, по требованиям [10, 11].

Изготовление опытных образцов. Вязаные пространственные арматурные каркасы опытных образцов изготавливались в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета с применением вязальной проволоки диаметром 0,8 мм, общий вид каркасов представлен на рисунке 2.

После изготовления пространственных арматурных каркасов опытные образцы бетонировались в металлодеревянной опалубке в лаборатории Полоцкого государственного университета. Для облегчения распалубливания образцов опалубка смазывалась машинным маслом. В качестве ограничителей для создания защитного слоя бетона использовались стандартные держатели (рисунок 3). Бетонирование образцов выполнялось в вертикальном (рабочем) положении.

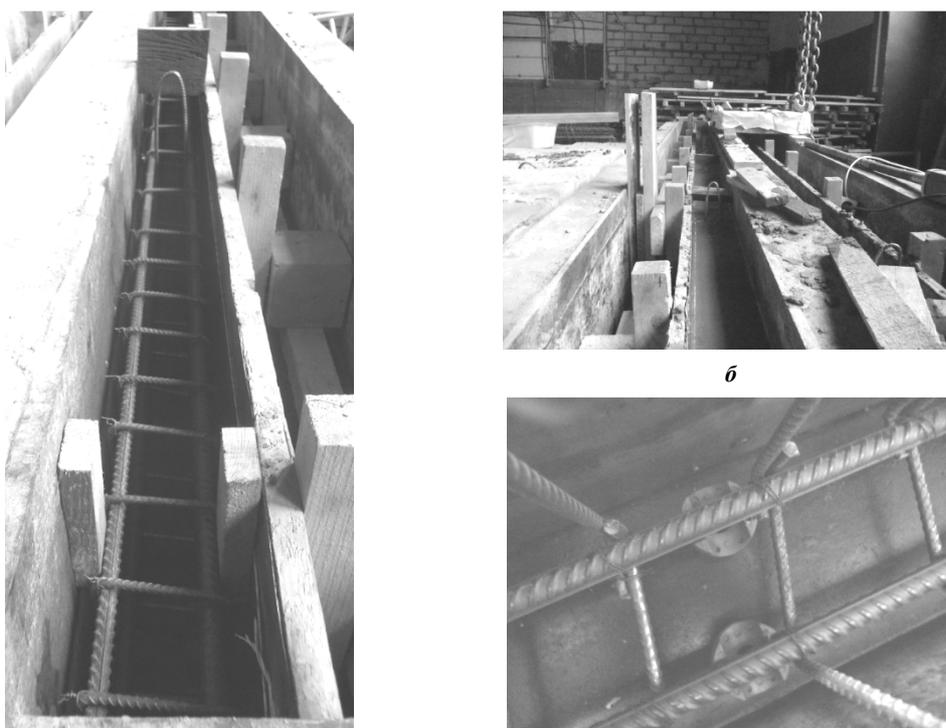
Уплотнение бетонной смеси производилось глубинным вибратором. Набор прочности проходил в естественных условиях.

При изготовлении бетонной смеси опытных образцов применялся портландцемент марки 500 Д-0 Кричевского цементного завода. В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5–20 мм, мелкого заполнителя – кварцевый песок с объемным весом 1630 кг/м³ и модулем

крупности 1,62. Бетонная смесь для бетонирования образцов приготавливалась водоцементным отношением В/Ц = 0,53. Для лабораторных испытаний с целью определения физико-механических свойств бетона, одновременно с бетонированием образцов, из бетонной смеси тех же замесов были изготовлены призмы размерами 100 × 100 × 400 мм и кубы 100 × 100 × 100 мм.



Рисунок 2. – Общий вид вязаных каркасов образцов-балок

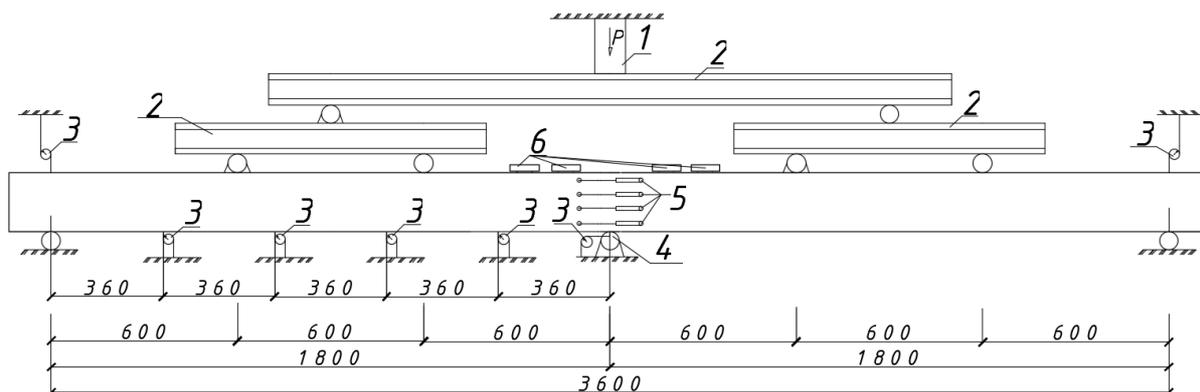


a – арматурный каркас в опалубке; *б* – забетонированный опытный образец;
в – стандартные держатели для создания защитного слоя бетона

Рисунок 3. – Бетонирование опытных образцов

Методика экспериментальных исследований. Предполагается испытание двухпролетных неразрезных, нагруженных четырьмя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно средней опоры на расстоянии 600 мм и 1200 мм соответственно, балок. Их нагружение будет произведено гидравлическим домкратом, подключенным к ручной насосной станции. Нагрузка от домкрата на балку распределяется через систему распределительных траверс, выполненных из прокатных швеллеров, которая разделяет нагрузку от домкрата на 4 сосредоточенные силы (по 2 в каждом пролете).

Для раскрытия статической неопределимости в качестве центральной опоры предполагается использование образцового динамометра известной жесткости с фиксацией величин осадок опор на каждом этапе. Для определения угла поворота опорного сечения относительно центральной оси будут применены электрические инклинометры, установленные на верхней грани балки вблизи центрального опорного сечения. Для определения прогибов предусмотрена установка прогибомеров часового типа БПАО в пролете и на опорах (для учета влияния осадки опор). Определение ширины раскрытия трещин будет проведено с помощью отсчетного микроскопа с ценой деления 0,05 мм. Для определения распределения относительных деформаций по высоте опорного сечения будет использована система комплексного мониторинга «Терем-4» с линейными измерителями деформаций, установленными на базе 200 мм в четырех местах по высоте сечения. Схема расстановки приборов приведена на рисунке 4. На рисунке 5 представлено фото испытательной установки.



1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;
4 – образцовый динамометр; 5 – система мониторинга «Терем-4»; 6 – электронный инклинометр

Рисунок 4. – Схема расстановки приборов на опытной балке



Рисунок 5. – Испытательная установка. Внешний вид

Заключение. В рамках программы экспериментальных исследований двухпролетных железобетонных балок с гибридным армированием растянутой зоны стальной и стеклопластиковой стержневой арматурой на промежуточных опорах авторами разработана методика их испытания, включающая разработку опытных образцов и технологию их изготовления. Результаты проводимых исследований позволят получить новые экспериментальные данные о характере работы нормальных сечений статически неопределимых железобетонных балочных элементов с гибридным армированием стальной и композитной

стеклопластиковой рабочей продольной арматурой, подтвердить теоретические предпосылки их расчета, а также проверить практическую эффективность внедрения такого вида армирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. FRP Reinforcement for reinforced concrete structures : fib 2005. – Task Group 9.3 Fiber-Reinforced Polymer. – Lausanne, 2005. – 173 p.
2. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars : ACI 440.1R-03, American Concrete Institute. – Farmington Hills, 2003. – 81 p.
3. Гиль, А.И. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения / А.И. Гиль, Е.Н. Бадалова, Е.Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 48–53.
4. Мясников, А.Л. Изгибаемые конструкции со стеклопластиковой арматурой / А.Л. Мясников, Е.П. Телешман, А.А. Варламов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : материалы 72-й междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – Т. 2. – С. 70–74.
5. Польской, П.П. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжелого бетона [электронный ресурс] / П.П. Польской, Мерват Хишмах, Михуб Ахмад // Эл. журнал Инженерный вестник дона. – 2012. – № 4. – Ростов н/Д. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/14246452>. – Дата доступа: 01.12.2019.
6. Польской, П.П. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин [электронный ресурс] / П.П. Польской, Д.Р. Маилян. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-stalnogo-i-kompozitnogo-armirovaniya-na-shirinu-raskrytiya-normalnyh-treshchin>. – Дата доступа: 24.03.2015.
7. 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.
8. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение : ГОСТ 12004-81. – Введ. 15.12.81. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 16 с.
9. Гиль, А.И. Экспериментальное исследование механических свойств стеклопластиковой арматуры / А.И. Гиль, Е.Д. Лазовский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск : Колорград, 2017. – Вып. 9. – С. 168–183.
10. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП П-В.1-62*. – Введ. 01.01.1963. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1970. – 114 с.
11. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : ГОСТ 24452-80. Введ. 18.11.80. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.

Поступила 20.12.2019

EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH HYBRID REINFORCEMENT OF THE TENSIONED ZONE OF NORMAL SECTION AT THE CENTRAL SUPPORT

A. HIL, Y. LAZOUSKI

The methodology of experimental studies and a test setup is presented. The article discusses composite non-metallic reinforcement and the possibility of its use in conjunction with steel (hybrid reinforcement) in flexible concrete elements. The main disadvantages of composite reinforcing bars that impede the widespread adoption of composite reinforcement in the construction industry are shown. According to the results of the analysis of studies in this area, the prerequisites for the use of this type of reinforcement without the use of prestressing are presented, including in continuous reinforced concrete beams. The presented studies are focused on confirming the possibility and effectiveness of the use of hybrid reinforcement in continuous reinforced concrete beams in the tensioned zone of the support section, as well as testing the theory of analysis of such elements. For this purpose, an experimental research program has been developed. The characteristics and designs of prototypes of beams, the methodology for determining the physicomechanical properties of the materials used, and the features of the manufacture of prototypes are presented. For a full-scale experiment, samples of reinforced concrete beams were made using hybrid reinforcement.

Keywords: composite reinforcement, continuous beams, hybrid reinforcement.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 628.12

ОЦЕНКА МЕТОДИК, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ВОДЫ ПРИ АВАРИИ В ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО; Е.В. ЛЕСОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Определены и проанализированы потери воды при аварийной ситуации в сетях наружного водоснабжения населенных пунктов с оценкой методик их определения. Рассмотрены расчеты потерь воды трубопроводов по Инструкции в Республике Беларусь и по Методике, принятой в Российской Федерации. По результатам расчетов установлено, что для определения потерь воды при разрыве трубы более точными являются данные, полученные по гидравлическим формулам истечения воды через боковую поверхность трубы и по Инструкции Республики Беларусь.

Ключевые слова: водопотребление, экономия воды, утечки воды, потери воды при авариях, методика определения потерь воды.

Введение. На современном этапе развития коммунального водоснабжения городов Беларуси и России особую актуальность для сокращения водопотребления и устранения непроизводительных затрат приобретают вопросы оценки и управления утечками воды, поскольку они оказывают существенное влияние на себестоимость услуг как водопроводно-канализационных, так и промышленных предприятий с учетом местных производств. В Министерстве жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь утверждены нормы общих потерь воды для населенных пунктов в размере 12% от общего водопотребления по участку «водозабор – потребитель» с доведением этого показателя к 2024 году до 9%. Аналогичные нормы приняты и в Российской Федерации.

Основным резервом снижения затрат в системе жилищно-коммунального хозяйства является максимальное устранение негативного влияния потерь и неучтенного расходования всех видов ресурсов. Установлено, что потери воды в системах *водоснабжения*, в первую очередь, зависят от их технического состояния в комплексе элементов системы водоснабжения от ее добычи и очистки до подачи к потребителю [1; 2].

В системах наружного водоснабжения общие потери воды можно разделить на две основные части: учтенные и неучтенные. Утечки и неучтенные расходы воды представляют собой разность между количеством поданной в городскую сеть и реализованной воды потребителям, в частности населению. Если объемы воды при ее подъеме из источника и водоподготовке можно контролировать и достаточно точно определять, то при эксплуатации труб *наружной городской сети* и *водоразборных колонок* в случае аварийных ситуаций при разрыве труб, в результате коррозии и образования трещин такие потери практически не поддаются учету. Величину таких потерь прогнозируют по итогам предыдущего, как правило, года и уточняют по фактическому объему.

Потери воды в наружных сетях водоснабжения также, в первую очередь, зависят от их технического состояния, что на сегодняшний день является наиболее значимой проблемой. Начинать работу по снижению водопотребления и, соответственно, снижению энергопотребления предлагается с сетей наружного водоснабжения. Одной из основных причин потерь воды является неудовлетворительное техническое состояние водопроводных сетей, большая часть которых была построена еще в 70–80-х годах прошлого столетия. Во многих случаях потери воды в сетях водоснабжения могут достигать до 50% от количества воды, поднятой, очищенной и доставленной потребителю, что приближается к критическому уровню.

Для предотвращения полного износа необходимо ежегодно заменять не менее 3% сетей, но фактически заменяется намного меньше, что приводит к частым аварийным ситуациям с потерями и перерывами в подаче воды, вторичным загрязнением труб и т.д. [1; 2].

Цель работы – анализ методик определения потерь воды в аварийных ситуациях наружного водопровода, классификация причин аварийных ситуаций на трубопроводе и оценка объемов потерь воды.

Результаты работы и их обсуждение. Потери воды при авариях и утечках наружной водопроводной сети происходят при возникновении трещин (продольные, поперечные), свищевых повреждений, поперечных переломов или разрывов труб (рисунок 1). На величину потерь в аварийных ситуациях также будут влиять материал трубопровода, его длина и диаметр, продолжительность эксплуатации, разность давлений до и после участка, рост степени линейных параметров разрыва, сопротивление грунтов и про-

должительность утечек с момента аварии до отключения на ремонт. Первоначальный момент аварии определяется падением напора на рассматриваемом участке по данным диспетчерской службы водоканалов.



a – свищи (дыры), трещины; *б* – переломы, разрывы

Рисунок 1. – Характерные повреждения водопроводных труб

Появления свищей и трещин на поверхности металлической водопроводной трубы в виде отверстий различных размеров рассматривают как воздействие точечной коррозии, которая образуется от частичных разрушений материала либо от общего износа. Металл с каждым годом в таких изделиях все больше истончается с конечным прорывом стенки трубы. Стоит отметить, что ремонтные работы по устранению свищей являются временными мерами и не отменяют необходимость замены изношенных труб. Трещины, как правило, возникают также в металлических трубах в результате процессов местной коррозии, но могут быть и следствием воздействия на них вибрации или неравномерного воздействия грунта в различные периоды года. Например, установлено, что число повреждений увеличивается с октября по февраль [1]. Это объясняется тем, что при замерзании насыщенного осенней влагой грунта происходит неравномерное его сжатие. В дальнейшем (ноябрь – февраль) грунт промерзает по глубине. При наличии склонных к выпучиванию влажных грунтов происходят значительные деформации, влияющие на состояние труб и стыковых соединений.

Конечной стадией являются переломы труб, но этому подвержены и неметаллические трубопроводы. Разрывы труб характерны, прежде всего, в местах сварных соединений.

Причинами появления аварий на водоводах и сетях являются: возникновение гидравлических ударов при внезапном отключении электроэнергии или по другим причинам; вибрация стыков (особенно в зыбких грунтах), например, при движении тяжеловесного транспорта, приводящая к нарушению стыковых соединений; повышение напоров в сетях с целью поддержания расчетных расходов воды при загрязнении труб отложениями; электрохимическая и почвенная коррозия; блуждающие токи; недоброкачественное выполнение монтажных работ; постороннее воздействие на трубопроводы (например, при земляных работах).

Для расчета потерь воды трубопроводов в Республике Беларусь приняты общие утечки через повреждения водоводов и водопроводной сети, где вода выходит на поверхность земли (разрывы труб, разгерметизация и повреждение, стыков труб, коррозионные повреждения труб).

При этом расчетный годовой объем (м^3) определяют [3] по следующей формуле:

$$W_{\text{гт}} = 360(\omega_{\text{ср}} \cdot V \cdot t) \cdot N, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{ср}}$ – средняя площадь отверстия (трещины, пролома) в трубе и (или) повреждения в стыковом соединении (м^2), определяется как

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{\sum \omega_i}{N_{\text{ср}}}. \quad (2)$$

Здесь $\sum \omega_i$ – суммарная площадь отверстий (трещин, проломов) в трубах и (или) повреждений в стыковых соединениях (м^2) принимается как средняя величина по данным журнала регистрации и учета ремонтно-восстановительных работ за предыдущие два года; $N_{\text{ср}}$ – количество аварий с нарушением целостности труб и стыковых соединений, принимается как средняя величина за предыдущие два года; V – скорость выхода воды из отверстия (трещины, пролома) принимается равной 2 м/с; t – время

от момента обнаружения утечки до начала ремонтных работ, принимается для систем водоснабжения (I категория – 4 часа; II категория – 6 часов; III категория – 8 часов); N – количество выполненных ремонтно-восстановительных работ по ликвидации утечек за год, принимается как средняя величина за последние два года.

Например, неучтенные годовые потери воды в аварийных ситуациях наружной водопроводной сети города Новополоцка (Витебская область) в среднем составляют 6% [4].

В Российской Федерации утечки воды (m^3) в аварийных ситуациях определяются в зависимости от характера повреждений [5]:

$$\text{- общие повреждения труб} \quad W_{\text{ymi}} = 9600 \cdot t_i \cdot \omega_i \sqrt{H_i}; \quad (3)$$

$$\text{- свищи} \quad W_{\text{ymi}} = 1,92 \cdot t \sqrt{H_i}; \quad (4)$$

$$\text{- трещины} \quad W_{\text{ymi}} = 374,4 \cdot t \cdot d^2 \sqrt{H}; \quad (5)$$

$$\text{- переломы или разрывы} \quad W_{\text{ymi}} = 5652 \cdot t \cdot d^2 \sqrt{H}, \quad (6)$$

где ω_i – площадь живого сечения i -го отверстия (m^2); H_i , (H) – принимается равным средней величине напора воды в трубопроводе на поврежденном участке; при переломах и разрывах труб H принимается равным средней глубине заложения трубопровода 2 (м вод. ст.); t – продолжительность утечки с момента обнаружения до отключения поврежденного участка или заделки отверстия трубопровода; d – приведенный диаметр повреждения труб, м.

Процесс образования поломки труб и характер истечения воды можно охарактеризовать как нестационарный и нестабильный. В начальный момент происходит мгновенный выброс воды со снижением давления, иногда до атмосферного. Далее происходит постепенный рост утечки воды с преодолением сопротивления грунта и последующее равномерное истечение из разрыва трубы или изменение (практически увеличение) этой величины, если наблюдается рост общей площади разрыва.

На основании поведения потока жидкости под давлением при истечении из отверстий и известных гидравлических формул [6] можно предложить следующую методику определения потерь воды при повреждении трубопроводов:

Расчетный мгновенный расход воды через повреждение трубы ($m^3/ч$):

$$Q_{\text{мгн}} = \left(\frac{d_{\text{пр}}}{3,16} \right)^2 \cdot \sqrt{P}, \quad (7)$$

где $d_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр участка разрыва трубы (мм), определяется по формуле (8):

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{ут}}}{\pi}}; \quad (8)$$

P – избыточное давление трубы (МПа), равное разности давлений на участке трубопровода до и после повреждения, в первый момент утечки воды можно принять равным давлению в водопроводной сети.

Истечение из отверстия в сосуде под постоянным начальным давлением можно принять как равномерное, и тогда расход воды ($m^3/с$) за промежуток времени t определится по следующей формуле:

$$Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}}, \quad (9)$$

где ε – коэффициент сжатия струи, равный 0,63; φ – коэффициент снижения скорости, равный при прямоугольном сечении истечения 0,9; ρ – плотность жидкости при нормальных условиях составляет 981 кг/м^3 .

Общий объем воды (m^3) составит:

$$W = W_{\text{мгн}} + W_{\text{пост}} = Q_{\text{мгн}} \cdot t_{\text{мгн}} + Q_{\text{пост}} \cdot t_{\text{пост}}. \quad (10)$$

Здесь $t_{\text{м}}$ – продолжительность выброса воды через повреждения для мгновенного периода можно принять 0,25–0,3 ч; остальное – при постоянном расходе.

Рассмотрим аварийную ситуацию на участке в 65 м наружного водопровода с условным диаметром 150 мм, давлением 0,7 МПа. Размер прямоугольного разрыва $0,38 \times 0,027 \text{ м}$ ($S_{\text{ут}} = 0,0103 \text{ м}^2$). Значе-

ние давления после точки разрыва составляет 0,4 МПа. Продолжительность истечения воды в месте разрыва – 6 ч. Для оценки объемов потерь воды в начале и конце аварийного участка были установлены приборы учета воды, разница в показаниях которых составила 441,7 м³.

Приведенный диаметр разрыва трубы определяется следующим образом:

$$d_{пр} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ут}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0103}{3,14}} = 0,115 \text{ м, или } 115 \text{ мм.}$$

Определим потери воды, используя приведенные различные методики.

По Инструкции Республики Беларусь [3] принимаем предложенную формулу как частный случай:

$$W_{ум} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{ут}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0103}{3,14}} = 0,115 \text{ м, или } 115 \text{ мм.}$$

По методике Российской Федерации [5] принимаем как трещиноватое повреждение труб:

$$W_{ум} = 3600(\omega_{ср} \cdot V \cdot t) \cdot d^2 \sqrt{H} = 374,4 \cdot 6 \cdot 0,115^2 \sqrt{\frac{70+40}{2}} = 220,3 \text{ м.}$$

По гидравлическим формулам расчет потерь истечения воды под давлением из отверстий:

- расчетный мгновенный расход воды:

$$Q_{мгн} = \left(\frac{d_{пр}}{3,16}\right)^2 \cdot \sqrt{P} = \left(\frac{115}{3,16}\right) \cdot \sqrt{0,7} \approx 1100 \text{ м}^3 / \text{ч,}$$

- постоянный расход воды при аварии трубопровода, принимая в приближении избыточное давление, равен среднему значению в точке разрыва:

$$Q = \varepsilon \cdot \phi \cdot \omega \cdot \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} = 0,63 \cdot 0,9 \cdot 0,0103 \sqrt{2 \cdot 0,55} = 0,00584 \text{ м}^3 / \text{с, или } 21 \text{ м}^3 / \text{ч.}$$

Общая величина потерь воды равна:

$$W = W_{мгн} + W_{пост} = Q_{мгн} \cdot t_{мгн} + Q_{пост} \cdot t_{пост} = 1100 \cdot 0,3 + 21 \cdot 5,7 = 449 \text{ м.}$$

Полученные результаты представлены в таблице.

Сравнение результатов определения потерь воды

Способ определения объемов потерь воды	Объем потерь воды, м ³	Отличие полученных результатов от значения по приборам учета воды, %
По приборам учета воды	441,7	–
По Инструкции Республики Беларусь	445	+0,7
По методике Российской Федерации	220,3	–50
По гидравлическим формулам	449	+1,7

Заключение. Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что для определения потерь воды при разрыве трубы в отсутствие контроля за утечкой наиболее достоверными являются расчеты по Инструкции Республики Беларусь и по гидравлическим формулам истечения воды через боковую поверхность трубы. Результат расчета по методике Российской Федерации для рассматриваемого случая дает заниженное значение на 50%, что не соответствует реальным потерям воды. Также следует учесть, что если требуется полное опорожнение трубопровода во время ремонта, то к расчетной величине утечки воды добавляется ее объем, исходя из диаметра труб и протяженности участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, С.Г. Прогнозирование и оценка скрытых утечек из водопроводных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Г. Иванов. – Вологда, 1997. – 20 с.

2. Музалевская, Г.Н. Инженерные сети городов и населенных пунктов: учеб. пособие / Г.Н. Музалевская. – М. : Изд-во Ассоциация строит. вузов, 2006. – 148 с.
3. Инструкция по расчету норматива потерь и неучтенных расходов воды из систем коммунального водоснабжения населенных пунктов Республики Беларусь : утв. постановлением М-ва жилищно-коммунального хозяйства Респ. Беларусь от 31 авг. 2005 г., № 43. – 26 с.
4. Зыкова, Ю.В. К вопросу определения и анализа потерь воды в коммунальном водоснабжении крупных населенных пунктов / Ю.В. Зыкова, В.Д. Ющенко, Е.В. Лесович // Актуальные проблемы природообустройства региона : сб. науч. тр. – Калининград : КГТУ, 2017. – С. 95–102.
5. Методические указания по расчету потерь горячей, питьевой, технической воды в централизованных системах водоснабжения при ее производстве и транспортировке в Рос. Федерации : утв. приказом М-ва стр-ва и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации от 17 окт. 2014 г., № 640/пр. – М., 2014. – 21 с.
6. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства / Ю.Н. Саргин [и др.] ; под ред. И.Г. Старовойтова и Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1990. – Ч. 2 : Водопровод и канализация. – 247 с.

Поступила 20.06.2019

EVALUATION OF METHODS APPLICABLE FOR DETERMINING WATER LOSSES IN ACCIDENT IN WATER SUPPLY NETWORKS

V. YUSHCHENKO, E. LESOVICH

The article presents and analyzes water losses during an emergency in the external water supply networks of settlements with an assessment of methods for their determination. Identified and analyzed water losses in an emergency situation in the networks of external water supply of settlements with the assessment of methods for their determination. Calculations of water losses of pipelines according to the instructions in the Republic of Belarus and according to the Methodology adopted in the Russian Federation are considered. According to the results of calculations, it was found that the data obtained from the hydraulic formulas of water flow through the side surface of the pipe and the Instructions of the Republic of Belarus are more accurate for determining water losses when the pipe breaks.

Keywords: water consumption, water saving, water leakage, water loss during accidents, methodology for determining water loss.

УДК 658.26:536.7:666.97.035

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ
В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ****А.М. НИЯКОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет);**д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНИЮК**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассмотрены вопросы использования методологии эксергетического анализа применительно к теплотехнологиям промышленного производства бетонных изделий. Представлена методика расчёта эксергии бетонной смеси, поступающей в теплотехнологическую установку ускоренной гидратации. Показана взаимозависимость между эксергией бетонной смеси, дополнительными эксергетическими потоками, необходимыми для ускорения реакции гидратации цемента, и временем тепловой обработки изделий. На основе эксергетического метода термодинамического анализа разработан численный критерий, позволяющий осуществлять выбор режимов тепловой обработки бетона по критерию минимальных затрат энергии.

Ключевые слова: *теплоэнергетические системы, энергосбережение, теплотехнологии, термодинамический анализ, эксергия, производство бетонных изделий, установки ускоренной гидратации бетона.*

Введение. Рационализация потребления энергии в сложных производственных системах предполагает внедрение эффективных теплоэнергетических систем промышленных предприятий (ТЭСПП), разработка которых осуществляется на основе методов интенсивного энергосбережения, обеспечивающих минимизацию затрат топливно-энергетических ресурсов.

Основные положения теории интенсивного энергосбережения в сфере промышленных теплотехнологий представлены в работах А.Д. Ключникова [1; 2], В.М. Бродянского [3], Б.В. Сазанова [4], Б.М. Хрусталёва [5], других исследователей [6; 7] и предусматривают применение системного подхода к анализу ТЭСПП. В свою очередь, как отмечается в [6], системный подход диктует необходимость исследования совокупности технологически взаимосвязанных объектов для выявления полного потенциала энергосбережения. Причём, исходя из принципа единства системы [6], технологические и энергетические вопросы подлежат совместному рассмотрению [7].

Большая часть научных публикаций, посвящённых энергосбережению при производстве бетонных изделий, основывается на методологии материаловедения, науки о бетоне и посвящено в основном технологическим аспектам проектирования оптимальных составов бетонных смесей, формовки, уплотнения и тепловой обработки изделий. При этом особенности протекания тепловых процессов в теплотехнологических установках и самом бетонном изделии практически не рассматриваются или рассматриваются упрощённо. С позиций промышленной теплоэнергетики важно использовать методологию эксергетического анализа (ЭА) для исследования и разработки энергосберегающих методов и технологий тепловой обработки (ТО) бетонных изделий в теплотехнологических установках ускоренной гидратации. Авторами работы [8] предпринята попытка выполнить ЭА тепловых процессов, используемых в технологии изготовления бетонных изделий в пропарочной камере, с целью уменьшения энергозатрат. Однако основные результаты этой работы ограничились построением схемы эксергетических потоков в пределах теплотехнологической установки для проведения ТО и изложением известных положений методологии ЭА, опубликованных в [3; 6; 7]. При этом задача определения величины полезной эксергии, необходимой для получения бетонных изделий с требуемыми физико-механическими характеристиками, а также нахождения основных составляющих эксергетического баланса в работе [8] осталась нерешённой. Методология ЭА при исследовании жизненного цикла минеральных материалов в процессе их превращения в цемент, бетон обсуждена в [9; 10]. Однако в этих работах не были рассмотрены вопросы ТО бетонов в устройствах ускоренной гидратации. Всё это подтверждает актуальность исследований термодинамической эффективности процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках как основы для последующей разработки и формирования энергосберегающих технологий промышленного производства бетонных изделий.

Цель настоящей работы заключается в разработке основных теоретических положений, позволяющих применить метод ЭА к рационализации теплотехнологий, а также к выработке критериев для ранжирования энергопотребления при промышленном производстве бетонных изделий.

Объект, предмет и методология исследования. Объектом исследования в данной работе выступают теплотехнологические установки в неразрывном единстве с формируемым и подвергаемым ТО

бетонным изделием, а также режимы ТО бетона. Предметом исследования являются модели и методы, позволяющие выполнить ЭА и произвести выбор рациональных с энергетической точки зрения режимов ТО. Методология ЭА основывается на использовании первого и второго законов термодинамики во взаимосвязи с реальными условиями протекания процессов в рассматриваемой системе с учётом её материального и энергетического балансов. Целевыми функциями оптимизации в зависимости от предметной области анализа, выступают эксергетический КПД_е, потери эксергии, удельные затраты эксергии и энергозатраты, экономия условного топлива, а также различные экономические показатели, характеризующие эффективность капитальных вложений [1–3].

Содержание и результаты исследования. Теплоэнергетическая система промышленных предприятий может быть представлена как совокупность двух подсистем: энергообеспечения и энергопотребления. Вопросы выполнения ТДА и ЭА в отношении первой подсистемы рассмотрены, в частности, в работах [6; 7; 11; 12]. Исследования же термодинамических особенностей тепловой обработки бетонных изделий с позиций эксергетического анализа практически не проводились.

Составляющие эксергетического баланса при осуществлении тепловой обработки бетонного изделия представлены на рисунке 1.

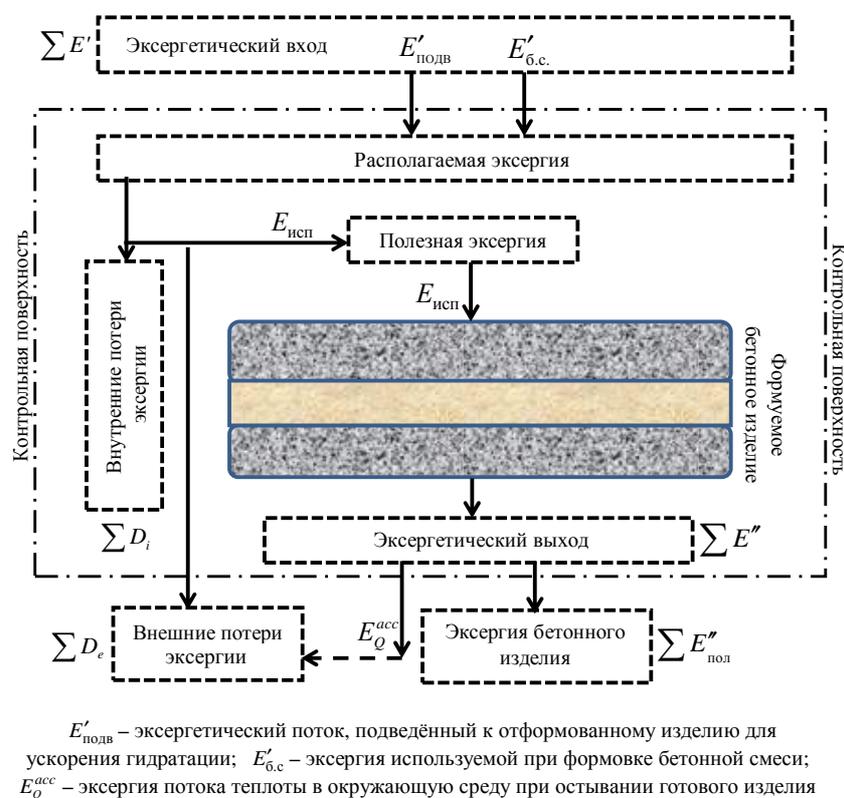


Рисунок 1. – Схема эксергетических потоков при тепловой обработке бетонного изделия

Контрольная поверхность выбрана по границам формуемого бетонного изделия. Такой выбор обосновывается следующими соображениями: 1) поток реакционно активной бетонной смеси, участвующий в энергетических превращениях, подается на стадию формовки; 2) отформованная бетонная смесь занимает место в ТТУ в пределах объема, ограниченного поверхностью формы; 3) механическое и тепловое воздействие на изделие с целью ускорения гидратации осуществляется по его внешней поверхности; 4) такой выбор контрольной поверхности позволяет игнорировать внетехнологические потери эксергии, не связанные с ТО бетонного изделия (поверхностью оборудования, трубопроводов и т.п.); 5) готовое бетонное изделие после завершения ТО и распалубки сохраняет свою форму, его теплообмен с окружающей средой происходит по границам поверхности.

Эксергетический поток $E'_{подв}$, подводимый к отформованному изделию для ускорения гидратации, включает в себя все возможные виды энергетического воздействия на бетон: механическое $E_{мех}^{in}$, тепловое E_Q^{in} и химическое $E_{хим}^{in}$.

Внутренние потери эксергии ΣD_i в процессе ТО связаны, во-первых, с неполнотой процесса гидратации, обусловленной недостаточным взаимодействием между цементом и водой при формировании цементного геля, в результате чего химическая реакция гидратации протекает неполно, часть цемента

в ней не участвует, и изделие не набирает необходимой проектной прочности, а во-вторых, с потерями части энергии при осуществлении механического воздействия на бетон при его уплотнении (если оно проводилось). Внешние потери эксергии $\sum D_e$ вызваны тепловыми потерями с поверхности изделия в окружающую среду через конструктивные элементы теплотехнологической установки и/или непосредственно в атмосферу в течение времени проведения ТО.

Полезная эксергия $E_{исп}$ является комплексной величиной, включающей, в частности, эксергию теплового потока E_Q^{in} , подводимого непосредственно к бетонному изделию в ходе проведения ТО, и поток эксергии бетонной смеси $E'_{б.с.}$, расходуемый на создание изделия и достижение им заданной проектной прочности. Затраты теплоты на ТО должны обеспечить набор изделием распалубочной прочности в течение назначенной продолжительности тепловой обработки.

Часть цемента в бетоне после завершения ТО продолжает оставаться реакционно активной, формируя эксергию готового бетонного изделия $\sum E''_{пол}$. Эта эксергия в объёме $E''_{цем}$ расходуется на последующее достижение бетоном проектной прочности в условиях естественной (уже без подведения энергии из внешних источников) выдержки после распалубки. После завершения стадии ТО готовое бетонное изделие естественным образом охлаждается, и аккумулированная в нём эксергия теплового потока E_Q^{acc} приравнивается к внешним потерям эксергии, если обуславливающая её теплота не утилизируется, а рассеивается в окружающую среду.

Опираясь на разработанную схему эксергетических потоков, можно известное выражение для степени термодинамического совершенства теплоэнергетической системы [6], показывающее полноту использования эксергетического входа системой, записать как

$$v = \frac{\sum E''_{пол}}{E'_{подв} + E'_{б.с.}} \quad (1)$$

При $E'_{подв} = 0$ твердение бетона носит естественный характер, осуществляется без проведения ТО, и уравнение (1) приобретает вид

$$v^* = \frac{\sum E''_{пол}}{E'_{б.с.}} \quad (2)$$

Показатель v^* характеризует степень термодинамического совершенства такой идеальной организации процесса ТО, когда цели технической системы достигаются без подвода энергетических потоков к бетонному изделию в ТТУ извне. Разделив почленно уравнение (1) на уравнение (2), можно получить следующее соотношение:

$$\eta = \frac{v}{v^*} = \frac{E'_{б.с.}}{E'_{подв} + E'_{б.с.}} \quad (3)$$

Выполненное преобразование позволило исключить из рассмотрения величину эксергии $\sum E''_{пол}$, однозначное определение которой затруднено.

Уравнение (3) позволяет судить о степени термодинамического совершенства технической системы, предназначенной для проведения ТО бетонных изделий в теплотехнологической установке для ускоренной гидратации. Оно показывает, насколько технологически неизбежные энергетические затраты при ускоренной гидратации превышают энергетические затраты, которые приходится нести в естественных условиях твердения бетона (то есть без подвода теплоты извне). Причём уравнение (3) оперирует как локальными, свойственными данной технической системе показателями энергопотребления, так и глобальными, отражающими через эксергию «прошлые» энергетические затраты, например, на получение цемента.

Из всех компонентов эксергетического входа специального исследования требует эксергия бетонной смеси $E'_{б.с.}$, для которой следует определить структуру и способ вычисления.

Эксергия бетонной смеси включает все составляющие эксергии для потока вещества [3; 4; 6]:

$$e_{б.с.} = e_{r,б.с.} + e_{k,б.с.} + e_{pT,б.с.}, \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где $e_{r,б.с.}$, $e_{k,б.с.}$, $e_{pT,б.с.}$ – соответственно реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии бетонной смеси, кДж/кг.

Реакционная удельная массовая составляющая эксергии потока многокомпонентной системы, к которой следует отнести бетонную смесь, может быть определена как

$$e_{r, \text{бс}} = \sum g_j \cdot e_{\mu, j}, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

где g_j – массовые доли компонентов, составляющих бетонную смесь; $e_{\mu, j}$ – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов бетонной смеси, кДж/кг.

В общем случае бетонная смесь состоит: из соединяемых между собой в смесителе потоков минерального заполнителя (щебня и песка); вяжущего вещества (цемента); химических добавок (пластификаторов, ускорителей твердения); воды. Химическая составляющая эксергии минерального заполнителя (песка и щебня) равна нулю ($e_{\mu, j} = 0$), так как представлена в первую очередь диоксидом кремния SiO_2 , химическая эксергия которого может быть принята равной нулю [13]. Эксергия же цемента $e_{\text{цем}}$ может быть определена в соответствии с методикой, изложенной в [10]. Согласно этой методике цемент рассматривается как своего рода «продукт-энергоноситель», а эксергия цемента есть «комплексная энергетическая характеристика качества порошка цемента, учитывающая его химико-минералогический и дисперсный составы, (...) единый энерготехнологический критерий оптимизации (...), который учитывает все составляющие технологии цемента как единой системы механотермохимического превращения сырья в цемент» [10, с. 58].

Учитывая такую постановку вопроса и принимая в расчёт, что химическая эксергия песка и щебня равна нулю, уравнение (4) следует привести к следующему виду:

$$e_{\text{бс}} = e_{\text{цем}} \cdot g_{\text{цем}} + e_{k, \text{бс}} + e_{pT, \text{бс}}, \text{ кДж/кг}, \quad (6)$$

где $g_{\text{цем}}$ – массовая доля цемента в бетонной смеси.

Величина эксергии цемента $e_{\text{цем}}$ является индивидуальной характеристикой каждой его партии и находится в пределах от 7000 до 10000 кДж/кг, достигая в среднем значения ≈ 8000 кДж/кг [10].

В процессе соединения цемента и воды протекает реакция гидратации активных компонентов цементного клинкера. Однако в первый час такого взаимодействия гидратации подвергается не более 1% от общего количества цемента [14; 15], что позволяет при вычислении реакционной составляющей эксергии бетонной смеси вынести весь эксергетический эффект имеющих при этом место химических превращений за пределы смесителя, целиком отнеся его на стадию тепловой обработки бетонного изделия. Связанная с этим погрешность значительно меньше погрешности исходных данных и определения химической составляющей эксергии [3].

Концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси $e_{k, \text{бс}}$ предопределяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь компонентов [6; 9]. Указанная работа требуется для преодоления адгезионного взаимодействия между жидкой средой, образованной системой «вода – цемент», и минеральными инертными заполнителями.

Известно, что бетонные смеси являются многофазными системами, в которых дисперсионной средой служит вода, а дисперсной фазой выступают частицы заполнителя, вяжущего и воздушные включения [15–19]. Возникающие в них на ранних стадиях связи (до начала процессов схватывания) обусловлены главным образом межфазными взаимодействиями и взаимодействиями между отдельными частицами дисперсной фазы. При этом межфазные взаимодействия определяются в основном различными типами адгезионных и сорбционных связей.

Продолжительность перемешивания бетонной смеси задаётся опытным путём и в смесителях циклического действия составляет 60–150 секунд в зависимости от свойств бетонной смеси, объёма готового замеса и типа смесителя. Учитывая кинетику физико-химического взаимодействия компонентов бетонной смеси в смесителе и непродолжительное время перемешивания в нём, а также принимая во внимание ранее сделанный вывод об условной неизменности привнесённой цементом составляющей эксергии смеси в течение перемешивания, можно заключить, что основным фактором, определяющим термодинамическую работу разделения компонентов бетонной смеси применительно к узлу смешения, является работа адгезионного взаимодействия, обусловленная смачиванием твёрдой дисперсной фазы водным раствором продуктов, образующихся в самой начальной стадии превращений цемента. В итоге концентрационная составляющая эксергии готовой бетонной смеси в значительной мере будет определяться минимальной механической работой, необходимой для перемешивания всех её компонентов в смесителе [6; 9].

В силу особенностей химико-физического строения вода удерживается щебнем и песком за счёт адгезионных сил, обусловленных поверхностным натяжением и смачиванием. Природа взаимодействия цемента с водой носит принципиально иной характер, поскольку сразу же после соединения начинает

формироваться коагуляционная структура цементного геля. Сроки схватывания цементных гелей в отсутствие специальных подходов, направленных на их управление, составляют в зависимости от водоцементного соотношения от 2,5 до 13,5 часов, а при максимальном содержании ускорителей твердения соответственно от 10 минут до 4 часов [15–18]. Они многократно превосходят продолжительность пребывания компонентов бетонной смеси в смесительном агрегате.

Таким образом, отмеченные особенности смесеобразования позволяют принять за основу модель, предполагающую, что соединение твёрдых компонентов бетонной смеси с водой в смесителе происходит в результате адгезионного взаимодействия, обусловленного смачиванием твёрдой поверхности компонентов.

Удельная работа адгезионного взаимодействия воды и гладкой поверхности сухого твёрдого материала в системе «поверхность – вода – воздух» определяется на основании уравнения Дюпре – Юнга или его модификаций [20]:

$$W_{ад} = \sigma_{жсз} \cdot (1 + \cos \theta), \text{ Дж/м}^2, \quad (7)$$

где $\sigma_{жсз}$ – поверхностное натяжение воды, Дж/м² (или Н/м); θ – краевой угол смачивания воды к поверхности материала.

Следует учесть, что, во-первых, в условиях производства при транспортировке и хранении на поверхности твёрдых компонентов формируется слой воды за счёт адсорбции её паров из атмосферного воздуха и, во-вторых, поверхность материалов отличается шероховатостью. Для гидрофильной шероховатой поверхности краевой угол смачивания всегда меньше, чем для такой же поверхности, но гладкой. Также вода затворения не является химически чистой, содержит растворённые в ней химические вещества, в том числе и те, что поступили в неё в момент смешения с компонентами бетонной смеси. Действие этих факторов приводит к тому, что действительная работа адгезии не может быть определена однозначно и будет отличаться от величины, которая следует из уравнения (7). Поскольку поверхностное натяжение воды в диапазоне рабочих температур в смесителе составляет от $75 \cdot 10^{-3}$ до $69 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², работа адгезионного взаимодействия воды с поверхностями минеральных компонентов бетонной смеси при краевых углах смачивания θ , равных $0^\circ \dots 90^\circ$, лежит в пределах изменения $W_{ад} = (69 \cdot 10^{-3} \dots 150 \cdot 10^{-3})$ Дж/м². С учётом того, что твёрдые компоненты бетонной смеси относятся к хорошо смачиваемым материалам, наиболее вероятная величина работы адгезионного взаимодействия в рассматриваемых условиях находится в пределах $125 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², что и примем для последующей оценки структуры эксергии бетонной смеси.

Величина работы адгезионного взаимодействия материалов бетонной смеси в смесителе находится в прямой связи с удельной поверхностью, которая, в свою очередь, зависит от гранулометрических характеристик песка, щебня и цемента. Если известен гранулометрический состав заполнителей, применительно к бетонному производству их удельная поверхность может быть выражена в виде суммы по процентному соотношению соответствующих фракций и их удельной поверхности [16; 17]. Удельная поверхность смеси твёрдых компонентов $s_{тк}$ определяется вкладом их удельных поверхностей с учётом доли каждого из них в смеси. Доля цемента, песка и щебня в смеси определяется в зависимости от требований, предъявляемых при проектировании состава бетонов.

Например, для бетона общестроительного назначения класса В15 удельная поверхность твёрдых компонентов составляет $s_{тк} = 47,2$ м²/кг.

В соответствии с изложенной методикой и принятыми допущениями концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси

$$e_{к,бс} = s_{тк} \cdot W_{ад} = 47,2 \cdot 0,125 = 5,90 \text{ кДж/кг}.$$

Термомеханическая составляющая эксергии потока бетонного раствора определяется соотношением

$$e_{pT,бс} = \sum g_i (\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{бс}} \cdot ((t_{бс} - t_0) - T_0 \cdot \ln(T_{бс} - T_0))), \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

где $\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{бс}}$ – удельная массовая изобарная теплоёмкость бетонной смеси, средняя в интервале температур от t_0 до $t_{бс}$, кДж/(кг·К); T_0 , $T_{бс}$, К, (t_0 , $t_{бс}$, °С) – соответственно температуры окружающей среды и бетонной смеси.

Применительно к фактическим производственным условиям заводов ЖБИ температура бетонной смеси и температура окружающей среды соотносятся в зависимости от того, каковы температуры воздуха, твёрдых компонентов и воды. При положительных температурах наружного воздуха их можно принять

одинаковыми. При отрицательных температурах наружного воздуха инертные компоненты песок и щебень могут подвергаться разогреву, предотвращающему слипание. В некоторых технологиях подогревается и вода затворения. Интервал возможного изменения температур в этих процессах составляет от 5 до 50 °С.

Удельная массовая изобарная теплоёмкость средняя в интервале температур 5...50 °С определяется известным для смесей соотношением по заданному составу и теплоёмкости компонентов:

$$\bar{c}_p = \sum_{j=1}^n \bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{bc}} \cdot g_j, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}. \quad (9)$$

С учётом состава для бетона общестроительного назначения класса В15 удельная изобарная средняя теплоёмкость $\bar{c}_p = 1,097$ кДж/кг, термомеханическая составляющая эксергии $e_{pT,bc} = 5,425$ кДж/кг, а массовая доля цемента $g_{\text{цем}}$ составляет 0,1266 кг/кг. В итоге эксергия бетонной смеси, покидающей смеситель, составляет:

$$e_{bc} = g_{\text{цем}} \cdot e_{\text{цем}} + e_{pT,bc} + e_{k,bc} = 0,1266 \cdot 8000 + 5,42 + 5,90 = 1024 \text{ кДж/кг}.$$

В полученной величине эксергии бетонной смеси составляющая, привнесённая цементом, значительно (на два порядка) превышает остальные слагаемые. Таким образом, можно ограничиться достигнутой точностью полученного решения в отношении концентрационной и термомеханической составляющих эксергии и признать приемлемыми сделанные ранее допущения при их определении.

Найденная величина эксергии потока бетонной смеси представляет собой компоненту эксергетического входа в теплотехнологическую установку, предназначенную для формовки и ускоренной гидратации изделий. При этом основным располагаемым энергетическим ресурсом в ходе технологических преобразований вещества служит эксергия цемента, который в данном случае может рассматриваться как «вещество-энергоноситель». Остальные же эксергетические потоки, подаваемые на вход теплотехнологической установки ускоренного твердения, компенсируют внутреннюю и внешнюю потери эксергии в процессе производства.

В условиях реального производства предельная продолжительность твердения бетонных изделий обусловлена организационно-экономическими ограничениями: оборачиваемостью форм и установок, наличием складских площадей, установленной мощностью технологического оборудования, объёмом выпуска продукции. Если таких ограничений нет, то предпочтение следует отдавать естественному набору прочности изделиями. Следовательно, эксергетические характеристики процесса ТО должны рассматриваться в неразрывной связи с координатой времени.

Для выявления такой связи рассмотрим следующую модель. Пусть в некотором базовом процессе, предполагающем *минимальный внешний подвод энергии* на осуществление ТО, величина располагаемой эксергии на входе в теплотехнологическую установку, обусловленная наличием цемента в бетонной смеси $E'_{\text{цем}}$, такова, что по истечении *максимальной* технологической продолжительности этого процесса $z = z_0$ степень гидратации цемента достигнет заданного значения K_0 , а остаточное значение эксергии цемента на выходе установки составит $E''_{\text{цем}}$. Пусть при этом для компенсации внутренних и внешних потерь эксергии к системе подводится минимально необходимый эксергетический поток $E_0^{\text{ПОДВ}}$.

Если потребуются технологическую продолжительность процесса уменьшить с z_0 до z_1 , то достижение заданного уровня качества K_0 станет возможным лишь при увеличении величины подводимого к изделию потока эксергии $E_0^{\text{ПОДВ}}$ на дополнительный поток $\Delta E_1^{\text{ПОДВ}}$. Всякое сокращение наперёд заданной технологической продолжительности обработки z_i неизбежно ведёт к необходимости увеличивать значение $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$. В итоге потребная при этих условиях величина эксергетического входа системы E'_i увеличится по сравнению с $E_0^{\text{ПОДВ}}$ на $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$ в соответствии с выбранной технологической продолжительностью процесса z_i :

$$E'_i = E'_{\text{цем}} + \Delta E_0^{\text{ПОДВ}} + \Delta E_i^{\text{ПОДВ}}, \text{ кДж}. \quad (10)$$

При этом справедливы соотношения:

$$\begin{cases} E'_{i+1} > E'_i > E'_{i-1}; \\ z_{i+1} < z_i < z_{i-1}. \end{cases}$$

Потоки эксергии $E_0^{\text{ПОДВ}}$ и $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$ являются комплексными величинами, состав которых зависит от используемых методов энергетического воздействия на технологический процесс с целью интенсификации производства в соответствии с заданными параметрами времени и качества изготовления изделий:

$$E_0^{\text{ПОДВ}} = E_{\text{мех}}^{\text{ин}} + E_Q^{\text{ин}} + E_{\text{хим}}^{\text{ин}}, \text{ кДж}; \quad (11)$$

$$\Delta E_i^{\text{ПОДВ}} = \Delta E_{i,\text{мех}}^{\text{ин}} + \Delta E_{i,Q}^{\text{ин}} + \Delta E_{i,\text{хим}}^{\text{ин}}, \text{ кДж}, \quad (12)$$

где $\Delta E_{i,\text{мех}}^{\text{ин}}, \Delta E_{i,Q}^{\text{ин}}, \Delta E_{i,\text{хим}}^{\text{ин}}$ – соответственно дополнительно подведённые потоки эксергии за счёт механического, теплового и химического воздействия на параметры реализуемого технологического процесса, кДж.

Сокращение продолжительности технологического цикла z ведёт к росту коэффициента загрузки теплотехнологического оборудования, увеличению объёма производства и, следовательно, к более рациональному использованию энергетических ресурсов. Таким образом, прослеживается обобщённая связь между объёмом производства, продолжительностью технологического цикла и дополнительным эксергетическим потоком, который необходимо подать на вход ТТУ для ускоренного твердения бетона, чтобы в заданные сроки обеспечить достижение продукцией необходимых качественных характеристик.

С учётом изложенного для оценки термодинамической эффективности различных режимов и способов интенсификации процессов ТО бетонных изделий при заданной её продолжительности $z = z_i$ предлагается ввести следующий безразмерный численный критерий эксергетической эффективности режима тепловой обработки бетонных изделий:

$$\bar{K}(z) = \frac{E_0^{\text{ПОДВ}} + \Delta E_i^{\text{ПОДВ}}}{E_0^{\text{ПОДВ}}} = 1 + \frac{\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}}{E_0^{\text{ПОДВ}}}. \quad (13)$$

Физический смысл критерия $\bar{K}(z)$ состоит в установлении «энергетической цены», которую необходимо будет уплатить за сокращение времени ТО с целью увеличения объёма производства по сравнению, например, с вариантом естественного твердения. Сокращение продолжительности технологического процесса с z_0 до z_i ведёт к увеличению потока подводимой к теплотехнологической установке эксергии на нужды ТО в $\bar{K}(z)$ раз. При этом объём выпуска изделий возрастает в $\bar{K}_N \approx z_0 / z_i$ раз.

Решение о сокращении времени ТО для увеличения выпуска продукции с энергетической точки зрения будет считаться эффективным при выполнении следующего условия:

$$\bar{K}_N \geq \bar{K}(z). \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14), таким образом, позволяют выполнять проверку энергоэффективности принимаемых технологических и организационно-экономических решений при планировании производственной деятельности.

Следует отметить, что в уравнениях (11) и (12) $E_{i,\text{мех}}^{\text{ПОДВ}}$ тождественна механической работе, которую необходимо произвести для уплотнения бетонной смеси; $E_{i,\text{хим}}^{\text{ПОДВ}}$ обусловлена увеличением активности цемента или его доли в смеси, а $E_{i,\text{тепл}}^{\text{ПОДВ}}$ численно равна теплоте, которую необходимо подвести извне в теплотехнологическую установку к бетонному телу для осуществления ТВО в заданное время. Определение первой составляющей лежит вне задач промышленной теплоэнергетики; её нахождение подробно рассматривается в работах, посвящённых технологии бетона [16; 21]. Что касается эксергии бетонной смеси, то её величина может быть определена на основании уравнений (4)–(9), полученных в настоящем исследовании.

Потребное количество теплоты, которое необходимо подвести извне к бетонному изделию с целью достижения бетоном назначенной прочности в заданное время, может быть определено в соответствии с методикой расчёта энергетических характеристик процесса ТО бетонных изделий в теплотехнологических установках, разработанной авторами (при участии А.Н. Чичко и Ю.В. Яцкевича) и опубликованной в работах [21–26].

Заключение и выводы

1. Разработан баланс эксергетических потоков применительно к процессам ТО бетонного изделия в теплотехнологической установке для проведения ускоренной гидратации.

2. Определена структура эксергии бетонной смеси. Предложена методика расчёта концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии бетонной смеси, учитывающая гранулометрический состав инертных компонентов, активность цемента, условия протекания процессов смеси-

образования. Показано, что для общестроительного бетона марки В15 эксергия смеси перед стадией формовки составляет 1024 кДж/кг, причём величина эксергии решающим образом определяется эксергией цемента, что позволяет ограничиться достигнутой при разработке методики точностью в определении концентрационной и термомеханической составляющих эксергии.

3. Разработана система критериев энергетической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в ТТУ, позволяющая производить оценку степени энергетического и термодинамического совершенства технической системы для проведения ТО и выбор рациональной продолжительности процесса ТО при планировании объёма выпуска продукции с учётом требований энергоэффективности.

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности их использования при разработке энергоэффективных режимов и способов интенсификации ТО бетонных изделий в теплотехнологических устройствах для осуществления ускоренной гидратации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключников, А.Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А.Д. Ключников // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 12–16.
2. Ключников, А.Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения / А.Д. Ключников // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С. 12–17.
3. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В.М. Бродянского. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
4. Сазанов, Б.В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
5. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий : учебник / Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск : Технопринт, 2005. – Ч. 1. – 544 с.
6. Романюк, В.Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.04 / В.Н. Романюк ; БНТУ. – Минск, 2010. – 365 л.
7. Романюк, В.Н. Энерготехнология производства асфальтобетонных смесей / В.Н. Романюк // Вестн. БНТУ. – 2003. – № 4. – С. 53–55.
8. Kots, I. Exergy analysis of thermal processes technology manufacture of building products / I. Kots, O. Kolesnik // Modern technologies, materials and design in construction. – Vinnica : Vinnitsia National Technical University, 2011. – № 1 (10). – P. 46–48.
9. Koroneos, C. Exergy analysis of cement production / C. Koroneos, G. Roumbas, N. Moussiopoulos // Int. J. Exergy. – 2005. – Vol. 2. – No. 1. – P. 55–68.
10. Эксергетический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента) / М.А. Вердиян [и др.]. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 68 с.
11. Муслина, Д.Б. Научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий лёгкой промышленности : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Д.Б. Муслина ; БНТУ. – Минск, 2016. – 197 л.
12. Бобич, Д.Б. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А.А. Бобич ; БНТУ. – Минск, 2018. – 224 л.
13. Степанов, В.С. Химическая энергия и эксергия веществ / В.С. Степанов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 163 с.
14. Нормантович, А.С. Регулирование процесса водоотделения цементно-водных дисперсных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / А.С. Нормантович. – Белгород, 2005. – 20 с.
15. Химия строительных материалов : учебник / Й. Планк [и др.]. – Шымкент : Южно-Казахстанский гос. ун-т им. М. Ауэзова, 2016. – 221 с.
16. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
17. Баженов, Ю.М. Технология бетона : учебник / Ю.М. Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
18. Райхель, В. Бетон : в 2-х ч. ; пер. с нем. ; под ред. В.Б. Ратинова – М. : Стройиздат, 1979. – Ч. 1 : Свойства. Проектирование. Испытания. – 111 с.
19. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии : учеб. для вузов / Д.А. Фридрихсберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1984. – 368 с.
20. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивания / А.Д. Зимон – М. : Химия, 1974. – 416 с.
21. Маслов, А.Г. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Вісник Кременчуцького держ. політехн. університету. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 5/2004 (28). – С. 45–49.

22. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А.М. Нияковский [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 2019. – № 3 (723). – С. 86–100.
23. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования для производства бетонных изделий на основе численного моделирования нестационарных процессов / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 177–191.
24. Дискретная оптимизация программно-управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 280–292.
25. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 307–324.
26. Нияковский, А.М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А.М. Нияковский, Ю.В. Яцкевич, А.Н. Чичко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. – 2019. – № 4. – С. 50–61.

Поступила 23.06.2019

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL BASES OF EXERGETIC ANALYSIS OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF CONCRETE PRODUCTS IN HEAT-TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS

A. NIYAKOVSKI, V. ROMANIUK

In the process of development and selection of energy-efficient methods of heat treatment of concrete products in heat-technological installations there is a need for the objective criteria that allow to rank the processing modes according to the criterion of energy consumption efficiency. The article proposes the usage of the exergy analysis methodology for this purpose. As a result of the research, the equations for calculating the exergy of the concrete mixture entering the thermal technological installation of accelerated hydration are obtained. It is shown that the value of the exergy of the concrete mixture is largely determined by the exergy of the cement. The interdependence between the exergy of the concrete mixture, additional exergy flows designed to accelerate the hydration process and the duration of the process cycle is shown. A numerical thermodynamic criterion for ranking the modes of heat treatment of concrete by the amount of energy consumption is proposed.

Keywords: heat power systems, energy saving, heat technologies, thermodynamic analysis, exergy, manufacturing of concrete products, installation for accelerated hydration of concrete.

УДК 628.336.3

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫРОГО ОСАДКА ПЕРВИЧНЫХ ОТСТОЙНИКОВ ГОРОДСКОЙ СИСТЕМЫ КАНАЛИЗАЦИИ

И.Э. ГОЛОВНЕВ

(Филиал «Витебскводоканал» УП «Витебсквоблводоканал»)

Рассматривается возможность использования воздействия ультразвуковыми излучателями магнитострикционного и гидродинамического циркуляционного типа на сырой осадок для повышения эффективности очистки сточных вод и снижения нагрузки по загрязняющим веществам на окружающую среду. Выявлено, что фазовый и вещественный состав сырого осадка значительно отличается от активного ила. При сопоставимом содержании загрязняющих веществ в твердой фракции, рост содержания БПК, ХПК для сырого осадка несколько меньше, но вклад растворимых веществ в эти показатели значительно больше. Определено, что воздействие ультразвуковой энергии (колебаний) на сырой осадок в анаэробных условиях способствует извлечению растворимых и легкоокисляемых органических веществ, которые являются ценным и наиболее дефицитным сырьем для питания активного ила.

Ключевые слова: сырой осадок, ультразвуковая обработка, состав фаз, очистка сточных вод.

Введение. В условиях жестких требований к качеству очистки сточных вод возникает необходимость в совершенствовании существующих технологий очистки, решающих задачи снижения эксплуатационных затрат, экономии ресурсов, компактности и простоты конструкций очистных сооружений. Решение этой проблемы лежит в применении технологии очистки, позволяющей использовать недорогое компактное и эффективное оборудование и, как следствие, снижение эксплуатационных затрат. Одним из перспективных, но мало изученных, методов воздействия на вещества для интенсификации технологических процессов является метод, основанный на использовании механических колебаний ультразвукового диапазона [1]. Специфические свойства акустических колебаний способствуют их использованию как экологически безвредного и эффективного метода интенсификации многих технологических процессов, способных, в том числе, оказать значительное влияние на скорость и эффективность очистки сточных вод.

Основная часть. Ультразвуковое воздействие на сырой осадок, как правило, не производилось, и данные по его влиянию на состав фаз осадка отсутствуют. Поэтому интерес представляет оценка возможности использования ультразвукового воздействия для направленного изменения состава жидкой фазы осадка. В первую очередь, важно оценить использование ультразвука с целью извлечения растворимых и легкоокисляемых органических веществ из сырого осадка, которые являются ценным сырьем для питания активного ила.

Компенсировать недостаток легкоокисляемых органических веществ для бактерий активного ила можно добавками химических соединений непосредственно в аэротенки, но это потребует значительных финансовых затрат, в то же время скорость денитрификации при добавках метанола и этанола в несколько раз ниже, чем в присутствии растворимых органических веществ [2].

Подкормив активный ил и тем самым улучшив его свойства и качество очистки, возможно извлечь питательные вещества из сырого осадка методом его *преферментации*.

Преферментацией принято называть процесс образования в анаэробных условиях короткоцепочных летучих жирных кислот (ЛЖК) из комплекса сложных органических соединений, находящихся в сточных водах. Способность к микробному разложению органических соединений непосредственно связана с длиной углеродной цепи, поэтому монокарбоновые кислоты или короткоцепочные ЛЖК с длиной цепи до 8 атомов углерода – идеальный источник органики для бактерий активного ила [3].

Легкоокисляемые органические вещества необходимы для нитрификации и дефосфотации.

Для определения влияния ультразвуковой обработки на состав сырого осадка и на процесс очистки в целом проводились комплексные исследования.

Как уже отмечалось, в частности в работах [2; 3], растворимая часть органических веществ является предпочтительным питанием активного ила и наиболее дефицитным компонентом сточных вод.

Цель исследований состояла в определении использования ультразвуковой энергии на извлечение растворимых и легкоокисляемых органических веществ из сырого осадка первичных отстойников очистных сооружений городской системы канализации. Исследования проводили в период 2015–2018 гг. с использованием сырого осадка очистных сооружений УП «Витебскводоканал», пробы осадка отбирали

батометром из приемка первичного отстойника. Для определения влияния ультразвукового воздействия УЗ-обработку проводили в условиях, описанных в [4], с использованием гидродинамического и магнито-стрикционного излучателей. В качестве входных переменных эксперимента рассматривали плотность ультразвуковой энергии и время обработки. Для оценки влияния ультразвукового воздействия на состав фаз сырого осадка определяли содержание ХПК, БПК₅, ЛЖК и концентрацию твердой фазы [5].

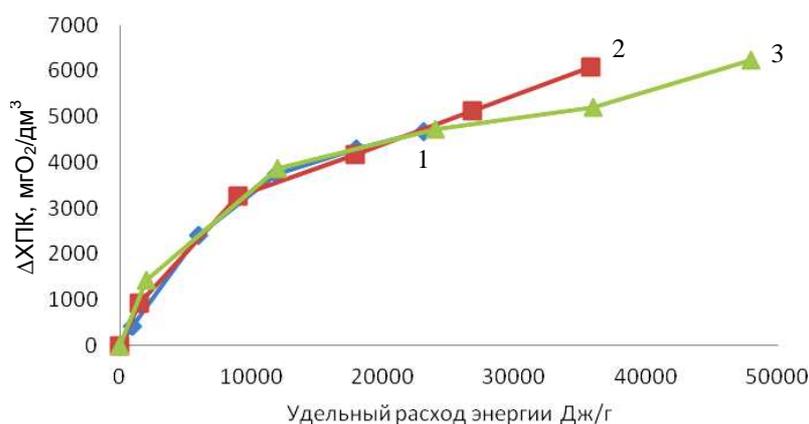
Как видно из результатов, представленных в таблице 1 и на рисунках 1–3, с увеличением плотности ультразвуковой энергии и времени обработки концентрация ЛЖК возрастает, как и содержание БПК₅ и ХПК. При этом отношение БПК₅ к ХПК несколько уменьшается с увеличением удельного расхода энергии на ультразвуковую обработку.

Фазовый и вещественный составы сырого осадка значительно отличаются от активного ила.

При сопоставимом содержании загрязняющих веществ в твердой фазе активного ила и сырого осадка увеличение содержания ХПК, БПК₅ для сырого осадка несколько меньше, но вклад растворенных веществ в эти показатели значительно больше.

Таблица 1. – Результаты исследования фильтрата сырого осадка от удельного расхода энергии на УЗ-обработку (концентрация С составляет 15,7 г/дм³)

Плотность ультразвуковой энергии, Вт/см ³	Время, с	Удельный расход энергии, Дж/г	ΔХПК, мгО ₂ /дм ³	ΔБПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	ΔЛЖК мг/дм ³	ΔС, %
3,15	5	998	413	230	180	0,3
	30	5992	2398	1630	366	9,8
	60	11924	3743	1945	580	11,4
	90	17977	4293	2130	762	12
	120	23069	4683	2380	976	13,1
4,70	5	1490	913	800	214	2,3
	30	8941	3263	2320	427	12,5
	60	17882	4163	2480	702	13,4
	19	26823	5123	2890	884	14,4
	120	35764	6083	2830	1128	15,4
6,30	5	1997	1423	1120	274	4,8
	30	11985	3863	2162	518	10,6
	60	23970	4713	2530	945	15,6
	90	35954	5193	2780	1067	15,5
	120	47939	6223	2840	1312	15,6



- 1 – плотность ультразвуковой энергии 3,15 Вт/см³;
 2 – плотность ультразвуковой энергии 4,70 Вт/см³;
 3 – плотность ультразвуковой энергии 6,30 Вт/см³

Рисунок 1. – Зависимость изменения прироста ХПК фильтрата сырого осадка (С – 15,7 г/дм³) от удельного расхода энергии на ультразвуковую обработку

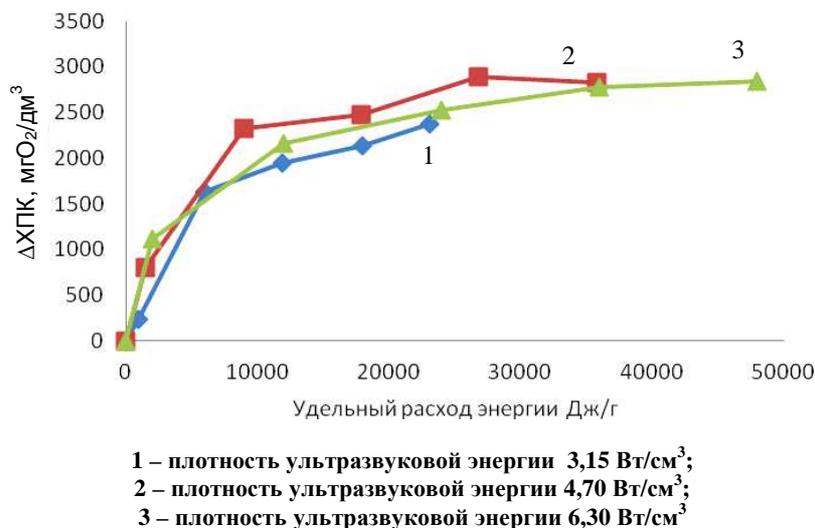


Рисунок 2. – Зависимость прироста БПК фильтрата сырого осадка ($C = 15,7 \text{ г/дм}^3$) от удельного расхода энергии на ультразвуковую обработку

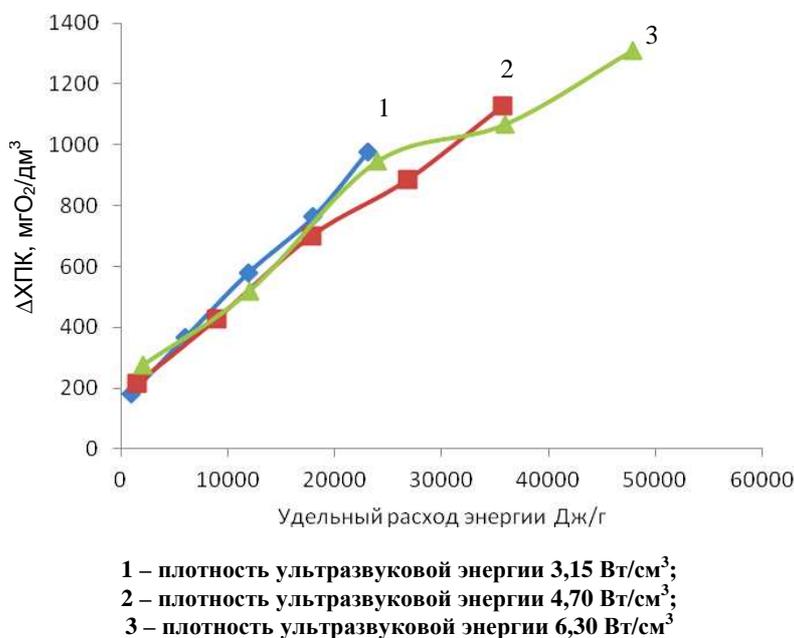


Рисунок 3. – Зависимость прироста ЛЖК фильтрата сырого осадка ($C = 15,7 \text{ г/дм}^3$) от удельного расхода энергии на ультразвуковую обработку

Увеличение содержания ЛЖК в жидкой фазе сырого осадка пропорционально увеличению удельного расхода энергии на обработку (рисунок 3), которое коррелирует с показателем БПК₅, особенно на начальном этапе обработки.

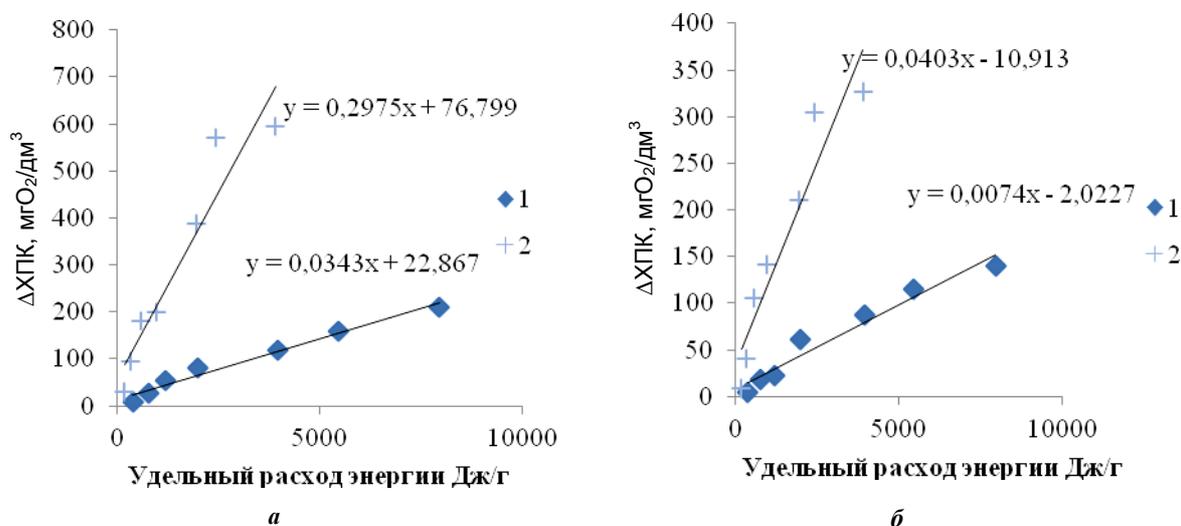
При воздействии на активный ил и сырой осадок ультразвуком в большинстве случаев целесообразно использовать акустические колебания с использованием гидродинамического излучателя, что позволяет более точно дозировать затраты энергии и время обработки для достижения желаемого результата. Гидродинамический излучатель способен излучать акустические колебания в частотном диапазоне от 3 до 35 кГц с интенсивностью 1,5–10 Вт/см².

Преимущества магнестрикционного и гидродинамического излучателей:

- низкая стоимость получаемой акустической энергии;
- простота конструкции и эксплуатации;
- струя жидкости приводит к интенсивному перемешиванию осадка.

Обработка сырого осадка на установке с гидродинамическим излучателем проводилась с использованием образцов осадков с содержанием сухих веществ 15,7 и 31,8 г/дм³.

Зависимость прироста ХПК жидкой фазы от удельного расхода энергии при обработке сырого осадка в исследуемом диапазоне концентраций носит линейный характер, что видно из рисунка 4.



1 – концентрация сырого осадка 15,7 г/дм³; 2 – концентрация сырого осадка 31,8 г/дм³

Рисунок 4. – Зависимость прироста ХПК фильтрата сырого осадка С – 31,8 г/дм³(а), С – 15,7 г/дм³(б) от удельного расхода энергии на ультразвуковую обработку на установке циркуляционного типа с гидродинамическим излучателем

УЗ-обработка сырого осадка с использованием гидродинамического излучателя циркуляционного типа также обеспечивает увеличение содержания ЛЖК в жидкой фазе, которое составило для осадка концентрацией 15,7 г/дм³ до 1312 мг/дм³ и концентрацией 31,8 г/дм³ до 2150 мг/дм³. При использовании гидродинамического излучателя в режиме циркуляции сырого осадка увеличивается содержание в жидкой фазе летучих жирных кислот, эквивалентное выдержке сырого осадка в течение 2–4 суток в анаэробных условиях.

Кроме выхода растворимых органических веществ из осадка в воду, сырой осадок уплотняется, уменьшается содержание органических веществ, уменьшается влажность, значительно снижается интенсивность запаха.

Сравнение результатов ультразвукового воздействия на сырой осадок и на уплотненный (избыточный) активный ил при одинаковых удельных энергозатратах с увеличением концентрации как избыточного активного ила, так и сырого осадка наблюдается прирост содержания ХПК, БПК₅. Для фильтрата избыточного активного ила с использованием магнитоотрицательного излучателя во всем диапазоне концентраций прирост ХПК носит линейный характер. Для фильтрата сырого осадка наблюдается значительное увеличение прироста ХПК с увеличением плотности ультразвуковой энергии и продолжительности обработки. Так, при плотности ультразвуковой энергии 6,30 Вт/см³ и концентрации избыточного активного ила 16,3 г/дм³, сырого осадка 15,7 г/дм³ в фильтрат переходит 6,4% и 15,5% твердой фазы избыточного активного ила и сырого осадка соответственно. С использованием плотности ультразвуковой энергии 3,15 Вт/см³ для тех же концентраций в фильтрат переходит 2% твердой фазы избыточного активного ила и 13,1% твердой фазы сырого осадка.

Анализ фильтрата избыточного активного ила после ультразвуковой обработки на установке с гидродинамическим излучателем свидетельствует о том, что при сравнимых удельных энергозатратах переход в жидкую фазу твердых частиц в виде растворенных соединений менее выражен.

Зависимость прироста содержания ХПК и ЛЖК жидкой фазы от удельных энергозатрат при ультразвуковой обработке сырого осадка на установке с гидродинамическим излучателем в исследуемом диапазоне концентраций носит линейный характер и оказывает более «мягкое» воздействие.

Заключение. Фазовый и вещественный состав сырого осадка значительно отличается от активного ила. При сопоставимом содержании загрязняющих веществ в твердой фракции рост содержания ХПК, БПК₅ для сырого осадка несколько меньше, но вклад растворенных веществ в эти показатели значительно больше.

Увеличение содержания ЛЖК в жидкой фазе сырого осадка пропорционально увеличению удельного расхода энергии, которое коррелирует с содержанием БПК₅, особенно на начальном этапе обработки. При использовании гидродинамического излучателя в режиме циркуляции сырого осадка увеличивается содержание в жидкой фазе летучих жирных кислот, эквивалентное выдержке сырого осадка в течение 2–4 суток. Легкоокисляемые органические вещества, извлеченные в процессе ультразвукового воз-

действия на сырой осадок, выделяющиеся в жидкую фазу и добавленные в очищаемые сточные воды, поступающие в аэротенки, улучшают окислительные свойства активного ила, следовательно, улучшают процессы денитрификации и дефосфотации, способствуют улучшению флокулирующих свойств (иловый индекс уменьшается на 20–27%).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина [и др.] ; под ред. И.П. Голямина. – М. : Сов. энцикл., 1979. – 400 с.
2. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М. : АКВАРОС, 2003. – 507 с.
3. Жмур, Н.С. Преферментация как метод улучшения свойств активного ила и интенсификации процесса глубокого извлечения из сточных вод соединений азота и фосфора / Н.С. Жмур. – М. : АКВАРОС, 2014. – 24 с.
4. Головнёв, И.Э. Влияние концентрации иловых суспензий на результаты ультразвуковой обработки осадка / И.Э. Головнёв, В.Н. Марцуль // Вестник Полоц. гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8.
5. Головнёв, И.Э. Использование ультразвуковой обработки для интенсификации и повышения эффективности биологической очистки сточных вод и улучшения свойств сырого осадка / И.Э. Головнёв, В.Н. Марцуль // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2019. – № 3. – С. 129–136.

Поступила 10.10.2019

THE POSSIBILITY OF USING THE ULTRASONIC TREATMENT OF RAW DEPOSIT OF THE PRIMARY RESERVOIRS OF THE URBAN SEWAGE SYSTEM

I. GOLOVNEV

Studies have been carried out on the possibility of using ultrasonic effects on raw sludge to increase the efficiency of wastewater treatment and reduce the environmental load of pollutants. We used ultrasonic emitters: magnetostrictive and hydrodynamic circulation type. The phase and material composition of the raw sludge is significantly different from activated sludge. With a comparable content of pollutants in the solid fraction, the increase in the content of BOD, COD for crude sludge is slightly less, but the contribution of soluble substances to these indicators is much larger. It was determined that the influence of ultrasonic energy (vibrations) on the raw sludge under anaerobic conditions promotes the extraction of soluble and easily oxidizable organic substances, which are the most valuable and scarce raw materials for feeding activated sludge. The increase in the content of readily oxidized fatty acids in the liquid phase of the crude sludge is proportional to the increase in specific energy consumption, which correlates with BOD, especially at the initial stage of processing.

Keywords: *crude sludge, ultrasonic treatment, phase composition, wastewater treatment.*

УДК 697.922(476)

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕЛИОСИСТЕМЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ КУЛЬТОВОГО ЗДАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО МИКРОКЛИМАТА

**Н.А. ВАСИЛЕВИЧ, Д.А. ВАСИЛЕВИЧ,
канд. техн. наук С.И. ПИВОВАРОВА
(Полоцкий государственный университет)**

Впервые предложена гелиосистема с абсорбированием тепла солнечной энергии для приточной механической системы вентиляции с целью улучшения микроклимата в культовом здании (церкви). Разработана и рассчитана схема пассивных коллекторов солнечной энергии и их размещение с учетом особенностей архитектурно-планировочных решений здания церкви. Работа выполнена в рамках решения задач по использованию возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь, созданию «зеленых» рабочих мест, а также энергосбережения.

Ключевые слова: культовое здание, микроклимат, гелиосистемы, коллектор солнечной энергии, энергоэффективная система вентиляции, энергосбережение, естественный воздухообмен, аэрация.

Введение. В Республике Беларусь, как и в Российской Федерации, более 30 лет идет активное восстановление, строительство и реконструкция культовых зданий, среди которых православные храмы, соборы и церкви, построенные в XII–XX веках [1].

По православному канону храм в плане может иметь различные формы [2–5], виды которых приведены в [6, прил. Д, Е и Ж]. Традиционным в православной церкви считается крестово-купольный храм. Основу здания образует четко читаемый в плане равноконечный греческий крест, над центром которого возводится купол – обязательный элемент православных культовых зданий. Многовековой практикой строительства культовых сооружений у славян выработано несколько типов сводчатых перекрытий, выполняемых кладкой из кирпича или естественного природного камня.

Все храмы могут быть объединены в три группы по общему характеру объемно-пространственной архитектурной композиции: с продольным развитием (по оси восток – запад), центричные (круг, треугольник, восьмиугольник), сложные (многопридельные).

Приделы могут располагаться на разных этажах, если церковь двухэтажная, и в разных отсеках одного этажа. В некоторых случаях делают пристройки к храму, где устраиваются отдельные приделы. Другим способом размещения приделов является устройство в цокольном этаже церкви, то есть в подклете. Устройство подклета увеличивает высоту церковного здания.

Храм разделяется на три основные части: притвор, средняя часть храма (помещение для молящихся) и алтарь. Алтарь обычно обращен на восток.

Освещение осуществляется посредством окон, лампад и свечей. Богослужебный устав предусматривает в одних случаях зажжение всех светильников, в других – почти полное их погашение.

Центр культового здания освещает большое паникадило – светильник, имеющий более двенадцати свечей или электрических ламп в форме свечей. Из боковых куполов спускаются светильники на 7–12 свечей. Большой подсвечник ставится всегда в центре храма у восточной стороны аналая. Лампады зажигают перед каждой иконой (у особо чтимых – несколько лампад).

На окнах православных храмов нет больших представительных витражей. На каждой стене рекомендуется иметь три или пять окон. Отношение площади световых проемов к площади пола или объема внутренних помещений церкви не регламентируется. Окна в церкви рекомендуется располагать так, чтобы нижний обреш оконных проемов приходился выше уровня глаз стоящего в храме человека.

Важное значение имеет акустика, которая достигается исторически сложившейся геометрией пространства храма и нахождением такой высоты церкви, чтобы поющий звук имел силу и резонанс с выгодными эффектами звукового пространства (полезные эффекты звуковой камеры).

Основная часть. Проектирование систем вентиляции и отопления культовых зданий сегодня необходимо выполнять с использованием технических норм, принятых в Республике Беларусь [6], которые схожи с нормами для проектирования микроклимата культовых зданий в Российской Федерации [7; 8].

Эксплуатация некоторых культовых зданий в городе Полоцке показала (и это характерно для многих других культовых зданий как в Республике Беларусь, так и в Российской Федерации [5]) ряд недостатков, допущенных при проектировании систем отопления и вентиляции из-за неучтенных архитектурно-планировочных особенностей, а также отсутствия норм на их проектирование в период выполнения реконструкции. На основе результатов обследования с использованием тепловизионной съемки и путем расчетов нами было предложено конструктивно усовершенствовать *систему отопления* [12] и расположение отопительных приборов по высоте помещения культового здания с учетом новых норм на проек-

тирование для индивидуальных жилых домов с высотой этажа более 4 м [9, п. 7.1.17]. При этом значительно изменяется микроклимат и характер движения потоков воздушной среды внутри здания.

Известно [3; 4], что еще сто лет назад учитывались особенности быстрого остывания воздушных потоков внутри культовых зданий: создавался дополнительный подогрев воздуха в холодный период года с использованием печного отопления и организовывался естественный воздухообмен и проветривание с учетом погодных условий. Например, простой способ, основанный на физическом законе, можно применить и сейчас [8]. Для этого в неотапливаемом помещении в наиболее холодной части здания ставится массивный стеклянный сосуд с водой для выравнивания температуры в сосуде с температурой в помещении. Сосуд периодически выносят на улицу. Если на улице стекло сосуда запотеваает, то это означает, что наружный воздух, попадая внутрь храма, при соприкосновении с элементами интерьера, имеющими ту же температуру поверхности, что и сосуд, будет приводить к выпадению конденсата. Следовательно, выполнять неорганизованный воздухообмен в культовом здании проветриванием в такие периоды нельзя. Положительный эффект для организации *аэрации* и естественного воздухообмена вызвало предложенное нами мероприятие для храма Покрова Пресвятой Богородицы в городе Полоцке (рисунок 1, а), которое успешно реализовали, установив электрооткрывающуюся фрамугу (электрофрамугу) с дистанционным управлением в оконном проеме под куполом над помещением для молящихся. Удобство регулирования электрофрамуги в том, что управление выведено на уровень 1,5 м от уровня чистого пола в отдельное помещение ризницы.

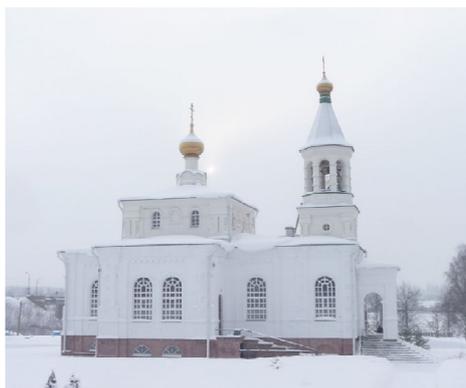
Удаление воздуха из помещений храма следует предусматривать аэрацией из верхней зоны с помощью вытяжных отверстий, расположенных в барабанах глав и куполах, или через заполнения световых проемов в верхней зоне храма [5]. Такая схема помимо эффективного удаления влаги, которая появляется после мытья полов и выделяется при дыхании людей, решает проблему отопления барабанов глав, повышая температуру на внутренних поверхностях стен, термическое сопротивление которых значительно ниже, чем для основных конструкций, и предотвращает выпадение конденсата на поверхности внутренних стен и потолка.

При проектировании системы отопления [12] нами впервые учтены в расчетах особенности архитектурно-планировочного решения культовых зданий с учетом изменения высоты под сводом купола церкви и собора с применением рекомендаций [9, п. 7.1.17]. Изменение высоты помещения для молящихся и высоты над окнами первого яруса создает быстрое охлаждение конвективных потоков над отопительными приборами, традиционно установленными под окнами [10]. Нами предложена схема системы отопления с расположением отопительных приборов на двух ярусах и проектирование второй ветки для обогрева купола. На первом ярусе необходимо размещать отопительные приборы на горизонтальном стояке над уровнем чистого пола выше на 70 мм под оконными проемами, на втором ярусе – гладкие трубы (стальные водогазопроводные по ГОСТ 3262-75*) под окнами купола на высоте +8,300 м (рисунок 1, б). Для работы котла в топочной используется теплоноситель с низкими параметрами – вода (60–25 °С), подогреваемая электрической энергией, вырабатываемой в плоском гелиоколлекторе; также применяется вакуумный расширительный бак.

Предложенные нами конструкции пассивных гелиоколлекторов для механической системы *приточной вентиляции* культового здания с использованием плоского коллектора солнечной энергии (далее – КСЭ) КСЭ № 1 и КСЭ № 2 с адсорбирующим наполнителем представлены на рисунках 2 и 3 с учетом рекомендаций [13].

Конструктивно КСЭ № 1 и КСЭ № 2 представляют собой плоские панели, расположенные под углом β , составляющим 53° (угол β равен широте местности), с восточного и южного фасадов здания церкви [16, § 16.3]. Адсорбер выполнен из пластин хорошо проводящего металла – меди. Использовано неселективное стекло, которое не пропускает волны светового и теплового излучений. В отличие от плоского солнечного коллектора здесь нет трубок, воздух абсорбирует тепло и нагревается непосредственно при контакте с пластиной адсорбера. Для увеличения площади теплоотдачи адсорбер имеет разную форму: в конструкции КСЭ № 1 адсорбером является накопитель из камней или красного глиняного кирпича. В коллекторе КСЭ № 2 адсорбер-накопитель выполнен из ребристого листа меди или двух расположенных один за другим медных листов: первый от стекла – перфорированный лист, а второй – ребристый. Коллектор должен быть хорошо изолирован со стороны стены здания, чтобы уменьшить тепловые потери. Циркуляция воздуха в таких системах может быть как естественной, так и принудительной с применением вентилятора и шумоглушителя (рисунок 4).

Ранее рассматривались конструкции плоских коллекторов с различным числом слоев остекления в плоском пассивном коллекторе солнечной энергии [12]. Принятая скорость движения воздуха в КСЭ равна 4 м/с. Кратность воздухообмена в здании церкви составляет не менее 30 м³/ч наружного воздуха на 1 человека [6] и одновременное нахождение в помещении 50 молящихся. Однако в большие праздники в помещении церкви присутствует на службах примерно на 150% больше людей, чем по нормам [6]. Для использования возобновляемых источников энергии, применительно к климатическим особенностям Республики Беларусь, нами предлагаются схемы расположения пассивных гелиоколлекторов КСЭ № 1 и № 2 относительно восточной и южной стен здания церкви и фасада с учетом рекомендаций [9; 13] (рисунки 4, 5).



а

б

а – фотоснимок храма Покрова Пресвятой Богородицы, Полоцк;
 б – изображение строящейся церкви, Полоцкий район, в редакторе Autodesk 3ds Max

Рисунок 1. – Архитектурный вид культовых зданий
 русской православной христианской церкви

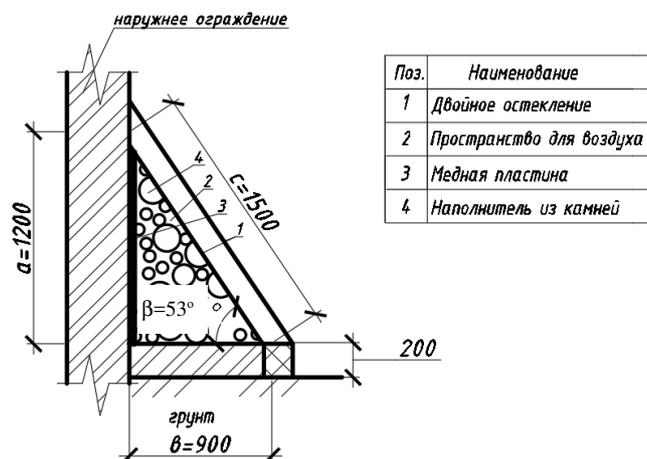


Рисунок 2. – Конструктивная схема коллектора солнечной энергии № 1,
 установленного наклонно у наружных стен с восточной и южной сторон

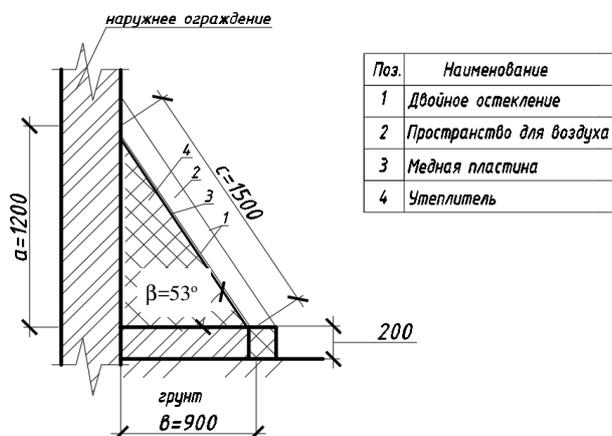


Рисунок 3. – Конструктивная схема коллектора солнечной энергии № 2,
 установленного наклонно у наружных стен с восточной и южной сторон

Мы предлагаем установить утепленный клапан, осевой вентилятор и шумоглушитель с внутренней стороны здания после КСЭ. Нами рассчитаны размеры плоского КСЭ № 2 и выбрана ширина щели для прохода воздуха, равная 50 мм, в соответствии с воздухообменом и нормами [6].

Для подогрева приточного воздуха можно использовать другие источники энергии, в том числе возобновляемые – энергию ветра или источники низкопотенциальной энергии для тепловых насосов.

В предложенной нами энергоэффективной схеме системы механической вентиляции используется солнечное тепло путем абсорбции в воздушных плоских и объемных КСЭ.

Забор воздуха для приточной механической системы вентиляции с КСЭ № 1 и КСЭ № 2 осуществляется с восточной стороны здания через три наружные воздухозаборные решетки марки РА4С-3, которые установлены на прямоугольном воздуховоде сечением 500×500 мм, закрепленном на наружной стене здания на высоте не менее 2000 мм [7–9] от поверхности земли.

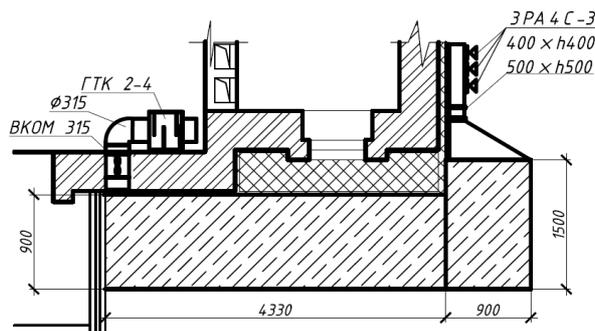


Рисунок 4. – Коллектор солнечной энергии, установленный у наружных стен церкви с восточной и южной сторон (вид сверху)

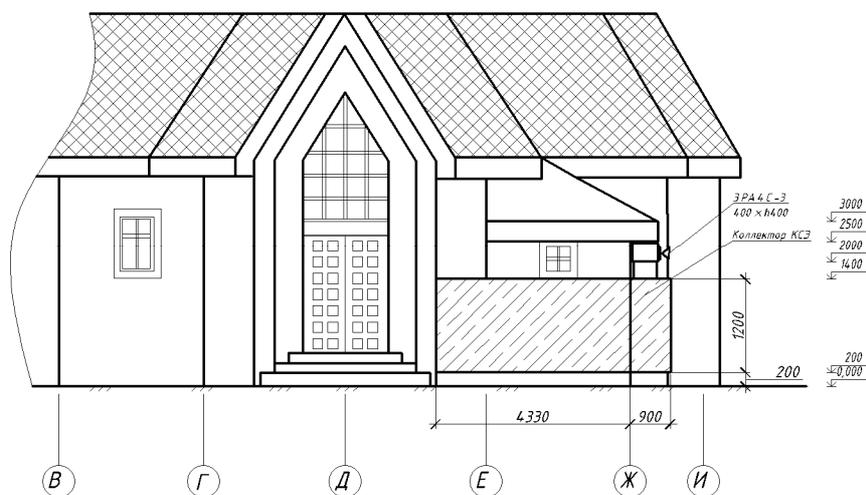


Рисунок 5. – Коллектор солнечной энергии, установленный у наружных стен церкви с восточной и южной сторон (фасад здания)

При аккумулировании энергии от гелиоколлектора можно в дальнейшем использовать ее в системе воздушного отопления или приточной вентиляции. Низ фундамента КСЭ расположен на высоте 250 мм над уровнем земли, что выше толщины снежного покрова и позволяет легко обслуживать поверхность КСЭ, содержать в чистоте солнцеприемную наклонную поверхность, сберегая до 30% солнечного потока.

Конструктивные особенности пассивного солнечного коллектора КСЭ № 1 (см. рисунки 2, 4, 5) отражены в следующем оборудовании:

- забор воздуха осуществляется с правой стороны от панели с помощью трех наружных воздухозаборных решеток марки РА4С-3;
- круглый оцинкованный стальной воздуховод монтируется к установке при помощи диффузора, осуществляя переход с круглого сечения на треугольное;
- диаметр воздуховода и конструкция диффузора подбирались в соответствии со справочником проектировщика [15, 16];

- после диффузора устанавливается утепленный клапан [10, 11, 15, 16];
- для помещения рассчитаны к установке вентилятор осевой низкого давления марки ВКОМ 315, калорифер электрический или на низкопотенциальном тепле, или от теплоутилизатора воздух–воздух;
- перед подачей воздуха в помещение установлен глушитель шума трубчатый марки ГТК 2-4.

Когда используются зажженные восковые или парафиновые свечи и сгорает лампадное масло, в помещении для молящихся отмечается негативное присутствие ниспадающих рециркуляционных конвективных воздушных потоков [8], которые содержат сажевые включения и при ниспадающем движении вдоль наружных стен приводят к оседанию сажевой пыли на стены, предметы и отопительные приборы, отрицательно влияют на интерьер, ухудшают микроклимат. Ранее [5] были рассчитаны влияние конструкций оконных переплетов, вентиляционных систем и выделяющихся вредностей на микроклимат культовых зданий, а также время эксплуатации здания без выпадения конденсата на внутренние поверхности стен при различной численности прихожан. Например, при численности 1000 человек время до выпадения конденсата на внутренних поверхностях храма во время службы составляет 2 ч 49 мин, 2000 человек – 1 ч 28 мин, 2500 человек – 1 ч 11 мин [5]. Отмечено, что без наличия систем вентиляции во время проведения молитвенной службы в культовом здании выпадение конденсата будет происходить быстрее в течение второго часа при численности в 2000 человек. Минимальный воздухообмен для разбавления углекислого газа и влаги должен составлять не менее 15 335 м³/ч при численности прихожан 1000 человек, 30 665 м³/ч – при 2000 человек и 38 335 м³/ч – при 2500 человек [5].

Заключение. С целью создания оптимального микроклимата в культовых зданиях, в которых предъявляются повышенные требования к интерьеру и акустике, а также использования возобновляемых источников энергии при реконструкции или строительстве систем их отопления и вентиляции [6; 10] с учетом технических нормативных требований, существующих в Республике Беларусь [1; 4; 6; 9; 13], рекомендуется применение гелиосистем. Использование КСЭ в культовом здании позволяет:

- 1) обеспечить воздухообмен согласно санитарным нормам, что улучшит микроклимат в помещении для молящихся и позволит работать общеобменной системе вентиляции для рассеивания вредностей от людей, сгорания свечей и лампад, что устранил негативное влияние ниспадающих воздушных потоков, возникающих при открытых наружных дверях и окнах;
- 2) рассматривать КСЭ как альтернативу гелиосистемам с жидким теплоносителем, а также с фотоэлектрическими преобразователями и аккумулярованием. Для подогрева теплоносителя воды в системе водяного отопления можно также использовать КСЭ. Для устранения недостатков желательно применять комбинированную схему тепло- и энергоснабжения инженерных систем [9];
- 3) использовать схему с сочетанием энергий от КСЭ и полученной в теплоутилизаторе позволит использовать тепло внутреннего удаляемого воздуха из культового здания (перед использованием удаляемый воздух необходимо очистить от копоти).
- 4) подогревать воздух в системах воздушного отопления или нагревать теплоноситель для систем водяного отопления за счет электрической энергии, полученной в плоских полупроводниковых КСЭ;
- 5) использовать энергию Солнца для получения электрической энергии в плоских КСЭ, а далее нагревать в котле теплоноситель воду для системы отопления культового здания. Обязательно выполнение рекомендации по проектированию отдельной ветки системы отопления для подкупольной зоны [12];
- 6) проектировать напольное отопление в некоторых помещениях с использованием энергии тепловых насосов и КСЭ [12];
- 7) в ночное время при необходимости использовать теплоту, накопленную в аккумуляторах тепла за солнечный световой день;
- 8) подавать и подогревать наружный приточный воздух и другие пассивные системы солнечной энергии по принципу «стены Тромба» [12].

В отличие от плоского солнечного коллектора в КСЭ нет трубок, воздух нагревается непосредственно при контакте с пластиной адсорбера. Для увеличения площади теплоотдачи адсорбер имеет ребристую форму или перфорацию. Коллектор должен быть хорошо изолирован со стороны стены здания, чтобы уменьшить тепловые потери. Циркуляция воздуха в таких системах может быть как естественной, так и принудительной с применением вентилятора и шумоглушителя. Мы предлагаем установить утепленный клапан, осевой вентилятор и шумоглушитель с внутренней стороны здания после КСЭ.

К недостаткам использования гелиосистем стоит отнести непостоянство поступления солнечной радиации в течение суток и года, а также несовершенство систем аккумулярования уловленной солнечной энергии [9; 12; 13].

Все предложенные нами схемы и обе предложенные конструкции коллекторов КСЭ № 1 и КСЭ № 2 достаточно просты с технической точки зрения (конструкция, монтаж) и удобно монтируются из доступных материалов и оборудования, производимых в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арлоў, Ул. Таямніцы Полацкай гісторыі / Ул. Арлоў – 2-е выд. дап. – Мінск : Полымя, 2002. – 464 с.
2. Бутурлинец, В.Б. Выбор места постановки деревянного культового строения и ориентация его воздухоприточных проемов в зависимости от климатических факторов местности / В.Б. Бутурлинец // Изв. вузов. Строительство. – 1996. – № 9. – С. 137–140.
3. Хрулёв, В.М. Обеспечение долговечности деревянных зданий зодчими Севера России / В.М. Хрулёв, Ю.А. Варфоломеев, Л.Г. Шаповалова // Изв. вузов. Строительство. – 1995. – № 4. – С. 111–114.
4. Кронфельд, Я.Г. Принципы устройства систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, тепло- и холодоснабжения в зданиях культовой архитектуры / Я.Г. Кронфельд // Авок. – 2000. – № 1. – С. 7–19.
5. Кочев, А.Г. Микроклимат православных храмов / А.Г. Кочев. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2004. – 448 с.
6. Культовые здания и сооружения. Здания, сооружения и комплексы православных храмов. Правила проектирования : ТКП 45-3.02-83-2007. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь (Минстройархитектуры Республики Беларусь), 2008. – 46 с.
7. Здания, сооружения и комплексы православных храмов : СП 31-103-99. – Введ. 1999–12–27. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – 34 с.
8. Храмы православные. Отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха : Стандарт АВОК-2-2004. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2004. – 12 с.
9. Системы отопления и вентиляции усадебных жилых домов. Правила проектирования : ТКП 45-4.02-74-2007 (02250). – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2008. – 36 с.
10. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : СНБ 4.02.01-03. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2005. – 62 с.
11. Внутренние инженерные системы зданий и сооружений. Производство работ. Правила монтажа (с изм.) : ТКП 45-1.03-85-2007. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2008. – 33 с.
12. Пивоварова, С.И. Энергоресурсосберегающие системы отопления и вентиляции культовых зданий с применением нетрадиционных источников энергии [Электронный ресурс] / С.И. Пивоварова, Д.А. Василевич, Н.А. Василевич // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т ; под ред. А.А. Бакатовича, Л.М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 409–417.
13. Гелиосистемы теплоснабжения жилых зданий для эксплуатационных условий Республики Беларусь : рекомендации по проектированию / В.В. Покотилов, М.А. Рутковский. – Минск, 2017. – 60 с.
14. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование / под ред. проф. Б.М. Хрусталёва. – Минск : ДизайнПРО, 1997. – 384 с.
15. Внутренние санитарно-технические устройства : справочник проектировщика : в 3 ч. / В.Н. Богословский [и др.] ; под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. – Изд. 4-е. перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1992. – Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1. – 319 с.
16. Внутренние санитарно-технические устройства : справочник проектировщика : в 3 ч. / В.Н. Богословский [и др.] ; под ред. И.Г. Старовойта и Ю.И. Шиллера. – Изд. 4-е. перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1990. – Ч. 1. Отопление. – 344 с.

Поступила 16.10.2019

FEATURES OF SOLAR SYSTEM DESIGN FOR MECHANICAL VENTILATION SYSTEM OF THE CULT BUILDING TO IMPROVE ITS MICROCLIMATE

N. VASILEVICH, D. VASILEVICH, S. PIVOVAROVA

For the first time the solar system with absorption of heat of solar energy for supply mechanical ventilation system for the purpose of improvement of a microclimate in a cult building – Church is offered. The scheme of passive solar collectors and their placement taking into account features of architectural and planning decisions of the Church building is developed and calculated. The work was carried out in order to solve the problems of using renewable energy sources in the Republic of Belarus, to create "green" jobs, as well as to save electricity and heat.

Keywords: *place of worship, climate, solar system, air solar energy collectors, energy efficient ventilation system, energy saving, natural air exchange, aeration.*

ГЕОДЕЗИЯ. ФОТОГРАММЕТРИЯ И ЗЕМЕЛЬНЫЙ КАДАСТР

УДК 528.7

ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ПЛАНА ФАСАДА ЗДАНИЯ ПРИ НАПРАВЛЕНИИ ОСЕЙ КООРДИНАТ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ПАРАЛЛЕЛЬНО ОСЯМ КООРДИНАТ УСЛОВНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

*канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА;
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрен вариант (последовательность действий) создания плана фасада здания при направлении осей координат фотограмметрической системы координат параллельно осям условной системы координат. Показано, что в этом случае более простые формулы перехода, чем при создании плана фасада здания, когда за направление оси Y фотограмметрической системы координат принят перпендикуляр к плоскости здания. Однако в рассматриваемом случае возникает проблема определения отстояний Y' до определяемых точек. Рассмотрено несколько вариантов определения отстояний Y' до определяемых точек. Предпочтение следует отдать варианту, когда определяется угол непараллельности плоскости фасада здания относительно оси координат XU условной системы координат по опорным точкам, отмеченным на фасаде здания. В этом случае можно создать как панораму здания, так и план фасада здания масштаба 1:500 и мельче при отстояниях до 30 м.

Ключевые слова: фотограмметрическая система координат, фасад здания, опорные точки, условная система координат, съемка.

В работе [1] рассмотрен вариант перехода от фотограмметрических координат к геодезическим (условным) координатам, когда ось Y фотограмметрической системы координат проходит перпендикулярно к плоскости здания. Путь перехода довольно сложен. Более простые формулы перехода имеют место в случае, когда за положительное направление оси Y фотограмметрической системы координат выбрано направление, параллельное оси Y_G геодезической системы координат, принятой в Беларуси и других странах СНГ, которые имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} X_G &= X_{S_r} + X, \\ Y_G &= Y_{S_r} + Y, \\ Z_G &= Z_{S_r} + Z, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_G, Y_G, Z_G – координаты определяемой точки в геодезической системе координат; $X_{S_r}, Y_{S_r}, Z_{S_r}$ – координаты центра фотографирования в геодезической системе координат; X, Y, Z – фотограмметрические координаты определяемой точки.

Формулы (1) применяют в случае стереофотограмметрической съемки, т.е. снимки имеют перекрытие порядка 60%. Однако, как известно [1], при направлении оси Y фотограмметрической системы координат перпендикулярно плоскости здания можно определить и отстояние Y . Предположим, что и в этом случае возможно определить отстояние Y по одиночному снимку.

Условная система координат, которая используется в электронном тахеометре, отличается от принятой в Беларуси системы координат. Ось Y_y условной системы координат направлена в противоположную сторону относительно как оси Y фотограмметрической системы координат, так и от оси Y_G геодезической системы координат. Преобразуем формулы (1) применительно к условной системе координат на основании рисунка 1.

Формулы перехода к условной системе координат, в которой вычисляет координаты электронный тахеометр, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} X_y &= X_{S_y} + X, \\ Y_y &= Y_{S_y} - Y, \\ Z_y &= Z_{S_y} + Z, \end{aligned} \quad (2)$$

где $X_y, Y_y, Z_y, X_{S_y}, Y_{S_y}, Z_{S_y}$ – условные координаты определяемых точек и центра проекции S .

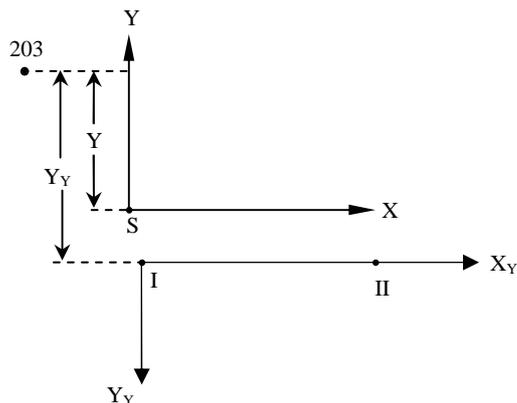


Рисунок 1. – Системы координат, принятые на объекте

Чтобы вычислить фотограмметрические координаты X, Y, Z точек, необходимо определить угловые элементы внешнего ориентирования α, ω и κ относительно принятой системы координат, показанной на рисунке 2.

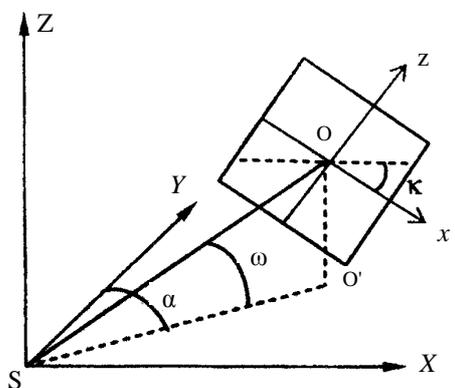


Рисунок 2. – Угловые элементы внешнего ориентирования

Электронный тахеометр определяет углы на определяемые точки в условной системе координат и для снимков, полученных обзорной камерой. Для снимка 357, который рассмотрен в работах [1; 3], эти углы составили величины, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. – Измеренные углы: горизонтальный угол γ_{357} и зенитное расстояние θ_{357}

Название	Обозначение	Значение
Горизонтальный угол для снимка 357	γ_{357}	$241^{\circ}20'44'',7$
Зенитное расстояние для снимка 357	θ_{357}	$73^{\circ}13'49'',6$

Чтобы оси координат были параллельны между собой, необходимо учесть значения взаимных углов между оптической осью обзорной камеры и визирной осью тахеометра, определенные в ходе калибровки. Приведем их в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты калибровки

Угол	$\Delta\alpha$	$\Delta\omega$	$\Delta\kappa$
Значение	$0^{\circ}21'38'',2$	$0^{\circ}07'38'',6$	$0^{\circ}13'59'',7$

Прибавив результаты калибровки к измеренным углам, получим горизонтальный угол для оптической оси и ее зенитное расстояние. Горизонтальный угол для оптической оси γ' для снимка с номером 357 можно вычислить по следующей формуле:

$$\gamma' = \gamma_{357} + \Delta\alpha. \tag{3}$$

Зенитное расстояние θ для оптической оси будет таким:

$$\theta = \theta_{357} + \Delta\omega. \tag{4}$$

Чтобы определить угол внешнего ориентирования ω , необходимо найти вертикальный угол оптической оси ν_{357} из следующего выражения [1]:

$$\nu_{357} = M_z - \theta, \quad (5)$$

где M_z – место зенита; θ – зенитное расстояние оптической оси для снимка с номером 357.

Вычисленные значения углов γ , θ , ν_{357} приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Горизонтальный угол оптической оси, ее зенитное расстояние и угол наклона

Название величин	Обозначение	Значение
Горизонтальный угол оптической оси	γ	241°42'22",9
Зенитное расстояние для оптической оси	θ	73°21'25",2
Угол наклона оптической оси	$\nu_{357} = \omega$	16°38'31",8

Необходимо также учесть, что главная точка объектива не совпадает с геометрическим центром электронного тахеометра на значения линейных элементов внешнего ориентирования. Эти величины меняются в зависимости от измеряемых горизонтальных и вертикальных углов. Для снимка 357 величины несовпадения приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Линейные элементы внешнего ориентирования снимка 357

X_Y^S , м	Y_Y^S , м	Z_Y^S , м
-0,002732	-0,038100	0,0739

Условная система координат – левая. Система фотограмметрических координат – правая.

Кроме того, ось Y_Y условной системы координат направлена в противоположную сторону относительно оси Y фотограмметрической системы координат. Поэтому элемент внешнего ориентирования α , который определяется относительно оси Y фотограмметрической системы координат, не будет равным измеренному углу γ . Измерения тахеометром выполнялись относительно оси X_Y условной системы координат, и угол α будет больше угла γ на 90°. Угловые элементы внешнего ориентирования ω и κ будут теми же, что и в работе [1].

Вышесказанное иллюстрирует рисунок 3.

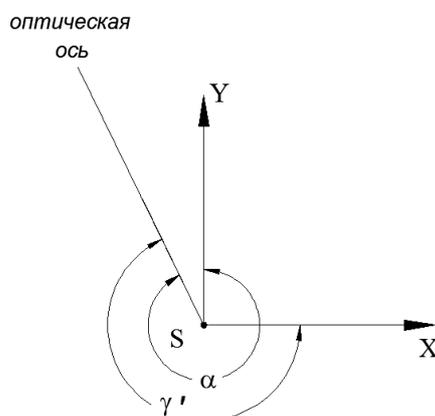


Рисунок 3. – Вычисление элемента внешнего ориентирования α

На рисунке 3 условная система координат не показана, так как ее оси параллельны осям фотограмметрической системы координат, а углы ω и κ равны приведенным в работе [1].

Значения угловых элементов внешнего ориентирования для снимка 357 α , ω и κ отразим в таблице 5.

Таблица 5. – Угловые элементы внешнего ориентирования

Дирекционный угол оптической оси	α^{357}	331°42'22",9"
Угол наклона оптической оси	ω^{357}	16°38'31",8"
Угол поворота снимка	κ^{357}	0°13'59",7"

По приведенным в таблице 5 угловым элементам внешнего ориентирования можно выполнить трансформирование координат по формулам [2]:

$$x_i = x_0 + f \frac{a_1 x + a_2 f + a_3 z}{b_1 x + b_2 f + b_3 z}; \quad z_i = z_0 + f \frac{c_1 x + c_2 f + c_3 z}{b_1 x + b_2 f + b_3 z}. \quad (6)$$

Здесь x_i, z_i – трансформированные координаты точек снимка; x, z – значения координат точек, измеренных на снимке; x_0, z_0 – координаты главной точки снимка; f – величина фокусного расстояния обзорной камеры, составляющая 21 мм [4].

Координаты главной точки x_0, z_0 примем равными нулю. Направляющие косинусы a_i, b_i, c_i вычислим через угловые элементы внешнего ориентирования снимка α, ω, κ по формулам [1]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos\alpha \cdot \cos\kappa - \sin\alpha \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa, & b_3 &= \sin\alpha \cdot \sin\kappa - \cos\alpha \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa, \\ a_2 &= \sin\alpha \cdot \cos\omega, & c_1 &= \cos\omega \cdot \sin\kappa, \\ a_3 &= -\cos\alpha \cdot \sin\kappa - \sin\alpha \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa, & c_2 &= \sin\omega, \\ b_1 &= -\sin\alpha \cdot \cos\kappa - \cos\alpha \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa, & c_3 &= \cos\omega \cdot \cos\kappa, \\ b_2 &= \cos\alpha \cdot \cos\omega, \end{aligned} \quad (7)$$

Значения направляющих косинусов приведем в таблице 6.

Таблица 6. – Значения направляющих косинусов

Направляющие косинусы	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3
Значения	0,88108	-0,45414	0,13216	0,47296	0,84365	-0,25411	0,0039	0,28639	0,95810

Значения измеренных координат для выбранных нами точек № 203 и 202 и трансформированных по формуле (6) представим в таблице 7.

Таблица 7. – Значения измеренных координат точек 203 и 202 на снимке

№ точки	203		202	
	x	z	x	z
Измеренные значения, мм	1,914	-1,693	-0,189	-1,832
Трансформированные значения, мм	-8,9001	4,8497	-11,5435	4,9430

Измерения координат точек выполнялись в программном комплексе AutoCAD 2007. Расположение точек показано на рисунке 4.

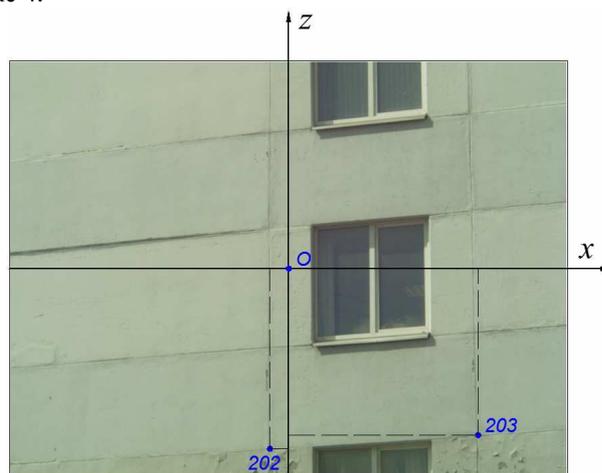


Рисунок 4. – Расположение измеряемых точек

Далее легко вычислить координаты точек объекта в фотограмметрической системе координат по формулам [5]:

$$X = \frac{Y}{f} \cdot x_i = Mx_i, \quad Z = \frac{Y}{f} z_i = Mz_i, \quad (8)$$

где M – знаменатель масштаба трансформированного снимка.

Однако, как видим, для определения координат X и Z необходимо знать отстояние Y . Определить отстояние Y этим способом с требуемой точностью вряд ли можно. Примем значение Y такое же, как и в работе [3]: $Y = 26,972026$ м. Результаты расчета приведены в таблице 8.

В таблице 8 также приведены координаты точек 203 и 202, полученные электронным тахеометром в условной системе координат X_Y, Z_Y .

Таблица 8. – Координаты точек 203 и 202 в фотограмметрической и условной системах координат

№ точки	X , м	X_Y , м	Z , м	Z_Y , м
203	-11,4312	-10,7100	6,2289	5,8856
202	-14,8263	-13,652	6,3487	5,874

Как видим, расхождения координат по оси X получились более метра, а по оси Z – более 0,5 м. При таких расхождениях возможно создать лишь панораму здания, к тому же низкого качества.

Попытаемся решить задачу другим способом. Из формулы (8) видно, что координаты X и Z можно получить через масштаб трансформированного снимка $1:M$. Знаменатель масштаба M определим через соотношение отрезков на объекте и на трансформированном снимке.

Расстояние на объекте вычислим через разность условных координат точек 203 и 202 (таблица 8) ΔX и ΔZ по формуле:

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Z^2} = 2,94202 \text{ м.} \quad (9)$$

Аналогичное расстояние на трансформированном снимке определим по формуле:

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2} = 2,6450 \text{ мм,} \quad (10)$$

где Δx и Δz – разность координат точек 203 и 202 на трансформированном снимке.

Как видно из формулы (8)

$$M = \frac{Y}{f} = \frac{D}{d} = 1112. \quad (11)$$

Используя полученный масштаб, по формуле (8) вычислим координаты X и Z , и приведем в таблице 9 вместе с условными координатами, определенными тахеометром.

Таблица 9. – Координаты точек 203 и 202 в фотограмметрической и условной системах координат

№ точки	X , м	X_Y , м	Z , м	Z_Y , м	Y_Y , м
203	-9,8969	-10,7100	5,3929	5,8856	-25,4471
202	-12,8364	-13,652	5,4966	5,874	-24,866

Как видим, получили меньшие расхождения координат, чем в таблице 8, но довольно значительные для того, чтобы создать план крупного масштаба.

На рисунке 2 показано направление оси Y фотограмметрической системы координат. Выясним, что будет являться отстоянием для точек 202 и 203 на основании рисунка 5.

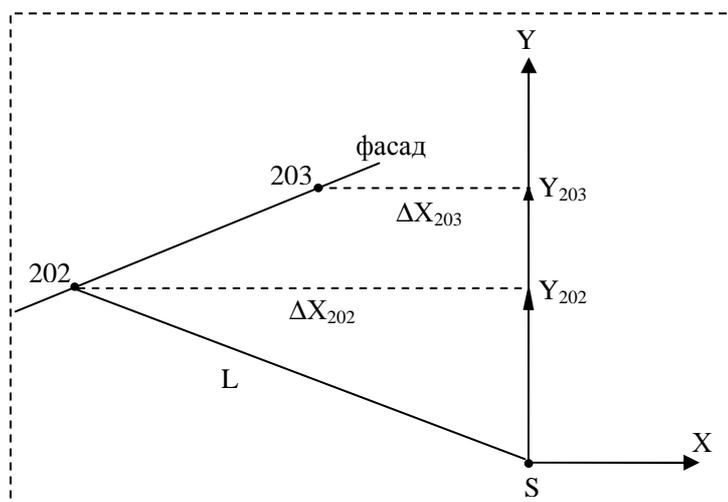


Рисунок 5. – Расположение опорных точек относительно принятой системы координат

Как видно из рисунка 5 отстояния для разных точек фасада здания будут проекциями искомым точек на ось Y , и они будут отличаться.

По условным координатам точек 203 и 202, приведенным в таблицах 8 и 9, а также точке S (таблица 4) легко вычислить фотограмметрические координаты рассматриваемых точек по формулам, полученным на основании формул (2):

$$\begin{aligned} Y &= Y_{S_Y} - Y_Y, \\ X &= X_Y - X_{S_Y}, \\ Z &= Z_Y - Z_{S_Y}. \end{aligned} \quad (12)$$

В таблице 9 приведены ординаты точек 203 и 202 в условной системе координат. На основании формул (12) найдем ординаты точек 203 и 202 (Y_{203} , Y_{202}) в фотограмметрической системе координат: $Y_{203} = 25,409$ м; $Y_{202} = 24,828$ м.

Рассчитаем для полученных ординат координаты X и Z по формулам (8), а по формулам (2) перейдем в условную систему координат. Полученные результаты сведем в таблицу 10.

Таблица 10. – Вычисленные координаты точек 203 и 202 в фотограмметрической и условной системе координат

№ точки	X , м формула (8)	X_Y , м формула (2)	Z , м формула (8)	Z_Y , м формула (2)
203	-10,7687	-10,7714	5,8679	5,9418
202	-13,6477	-13,6504	5,8440	5,9179

Сопоставим вычисленные условные координаты с координатами, полученными тахеометром, результаты сопоставления представим в таблице 11.

Таблица 11. – Сопоставление вычисленных условных координат с координатами, определенными тахеометром

№ точек	$X_{Y\text{выч}}$, м	$X_{Y\text{изм}}$, м	Разница, м	$Z_{Y\text{выч}}$, м	$Z_{Y\text{изм}}$, м	Разница, м
203	-10,7714	-10,7100	-0,0614	5,9418	5,8856	0,0562
202	-13,6504	-13,652	+0,0016	5,9179	5,874	0,0439

Как видно из таблицы 11, получены приемлемые по точности результаты, примерно такие же, что и в работе [3]. Однако координаты точек 203 и 202 определили тахеометром, а для других точек снимка определение отстояний для каждой измеряемой на снимке точки вызовет затруднения. Но если в ходе полевых работ выбирать расположение точек, с которых ведутся измерения тахеометром так, чтобы линия, соединяющая их (т.е. ось X_Y), была параллельна фасаду здания, то в этом случае отстояния до всех точек снимка будут одинаковыми и можно решить задачу рассматриваемым способом. Однако точность будет несколько грубее, чем в варианте, рассматриваемом в работах [1; 3]. Если требуется более высокая точность, необходимо решать задачу по методике, рассмотренной в работах [1; 3].

Выше мы определили знаменатель масштаба M через соотношение отрезков на объекте и на трансформированном снимке. Однако получили очень грубые результаты, так как фасад здания не параллелен оси X_Y и, следовательно, масштабы для разных точек снимка будут отличаться. Попытаемся найти знаменатели масштабов для точек 202 и 203 как отношение аппликат на объекте Z и на трансформированном изображении z_i по следующей формуле:

$$M = \frac{Z}{z_i}. \quad (13)$$

Значения M для точек 202 и 203 составили $M_{202} = 1191$; $M_{203} = 1213,6$. Формулы (8) выведены для случая, когда ось Y фотограмметрической системы координат совпадает с проекцией оптической оси на горизонтальную плоскость. В нашем случае обозначим эти отстояния Y' и на основании формулы (8) вычислим отстояния Y' для точек 202 и 203 по формуле (14):

$$Y' = fM. \quad (14)$$

В результате вычислений получили: $Y'_{202} = 25,011$ м; $Y'_{203} = 25,4856$.

С полученными отстояниями Y'_i рассчитаем X_i и Z_i по следующим формулам:

$$X_i = \frac{Y'_i}{f} x_i; \quad Z_i = \frac{Y'_i}{f} z_i. \quad (15)$$

Результаты расчетов приведем в таблице 12. В таблице укажем также условные значения координат, определенные тахеометром, и расхождения координат.

Таблица 12. – Вычисленные, условные координаты точек и расхождения координат

№ точки	$X_{\text{выч}}, \text{ м}$	$X_Y, \text{ м}$	Разность	$Z_{\text{выч}}, \text{ м}$	$Z_Y, \text{ м}$	Разность
202	-13,7483	-13,652	-0,0963	5,8871	5,874	0,0131
203	-10,8012	-10,710	-0,0902	5,8856	5,8856	0,000

Как видим, получили приемлемые по точности результаты, хотя и грубее, чем для случая, когда за направление оси Y фотограмметрической системы координат принят перпендикуляр к плоскости здания. Однако мы воспользовались опорными точками, по которым определили масштаб в разных частях снимка. Предположим, что мы имеем только опорную точку 202. Для того чтобы найти X_i и Z_i для других точек снимка, необходимо знать отстояние Y'_i для определяемых точек. Чтобы найти эти отстояния, определим угол непараллельности фасада здания оси X_Y условной системы координат по опорным точкам, имеющимся на фасаде здания (см. рисунок 6).

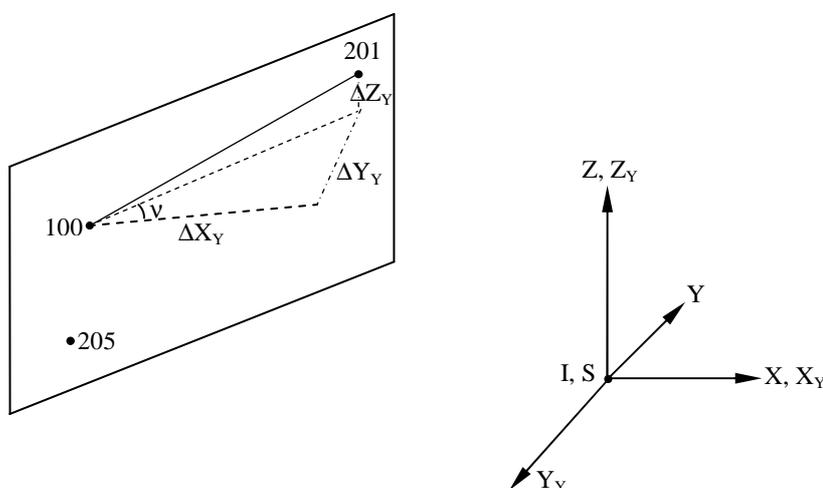


Рисунок 6. – Определение угла непараллельности фасада здания осям условной системы координат

• – положение точек и их номера на фасаде здания;
 X, Y, Z – направление осей фотограмметрической системы координат;
 X_Y, Y_Y, Z_Y – направление осей условной системы координат;
 $\Delta X_Y, \Delta Y_Y, \Delta Z_Y$ – приращения координат точки 100 относительно точки 201 в условной системе координат;

ν – угол непараллельности плоскости фасада здания относительно оси координат X_Y .

На рисунке 6 начала координат условной и фотограмметрической систем координат показаны совмещенными, так как расхождения между ними невелики.

Как видим, приращение координат ΔZ_Y (см. рисунок 6) не влияет на определение угла ν . Для контроля этого угла мы добавили точку 205.

Координаты X_Y, Y_Y и разности координат $\Delta X_Y, \Delta Y_Y$ точек 100 и 205 относительно точки 201 приведены в таблице 13.

Таблица 13. – Координаты X_Y, Y_Y и разности координат $\Delta X_Y, \Delta Y_Y$ точек 100 и 205 относительно точки 201

Координаты	201	205	100	$\Delta 100-201$	$\Delta 205-201$
$X_Y, \text{ м}$	-4,827	-20,200	-19,550	-14,723	-15,373
$Y_Y, \text{ м}$	-26,576	-23,587	-23,724	2,852	2,989

На основании рисунка 6 найдем угол ν :

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{\Delta Y_Y}{\Delta X_Y}; \quad \nu = \operatorname{arctg} \nu. \quad (16)$$

Результаты вычислений приведены в таблице 14.

Таблица 14. – Результаты вычислений угла ν

Пары точек	$\operatorname{tg}\nu$	ν
100–201	–0,19371	–11°06′
205–201	–0,19443	–11°08′,4

Как видим, получили незначительные расхождения, обусловленные неровностью плоскости фасада здания. Предположим, что имеется одна опорная точка 202. Ордината точки Y' 202 известна ($Y' = 25,011$). По вычисленным на трансформированном снимке абсциссам x_i (см. таблицу 7) определим разность абсцисс точек 203 и 202:

$$\Delta x_i = x_{i(203)} - x_{i(202)} = 2,6434 \text{ мм.} \quad (17)$$

По известному углу ν вычислим приращение ординат между определяемой точкой и опорной ΔY по формуле:

$$\Delta Y = \Delta X \operatorname{tg}\nu = \frac{Y'_{202}}{f} \Delta x_i \operatorname{tg}\nu = 0,6004 \text{ м.} \quad (18)$$

Тогда Y' для точки 203 будет: $Y'_{203} = Y'_{202} + \Delta Y = 25,6114$ м. Как видим, отстояние Y' тоже можно получить через угол ν .

По формулам (8), используя полученное значение Y'_{203} , вычислим координаты X и Z точки 203. Результаты вычислений, а также условные координаты и расхождения координат представим в таблице 14.

Таблица 15. – Значения вычисленных и измеренных тахеометром координат

№ точки	X , м	X_Y , м	Разница	Z , м	Z_Y , м	Разница
203	–10,8545	–10,710	–0,1445	5,9146	5,8856	0,029

Таким образом, получили приемлемые результаты, но грубее, чем в таблице 11, что и следовало ожидать, так как точку 203 получили по измерениям по снимку, которые также сопровождалась ошибками.

Для дальнейших расчетов примем, что средние ошибки по осям координат V_X и V_Z составят следующие величины: $V_X = 15$ см, $V_Z = 5$ см и определим, какого масштаба можно будет создать план фасада здания, удовлетворяющий требованиям Инструкции [6]. Средняя ошибка планового положения точек V_d будет вычислена по формуле:

$$V_d = \sqrt{V_X^2 + V_Z^2} = 0,158 \text{ м.} \quad (19)$$

Согласно Инструкции по фотограмметрическим работам [6] средняя ошибка на плане ν_d не должна превышать 0,3 мм. Средняя ошибка на плане фасада здания будет определена по формуле:

$$\nu_d = \frac{V_d}{M}, \quad (20)$$

где M – знаменатель масштаба создаваемого плана.

Тогда для планов масштабов 1:200; 1:300 и 1:500 значения ν_d будут равны величинам, приведенным в таблице 16.

Таблица 16. – Расчет средних ошибок на плане

M	200	300	500
ν_d , мм	0,79	0,53	0,31

Согласно данным таблицы 15, возможно создать план фасада здания масштаба 1:500 и мельче при выбранных параметрах съемки.

Можно получить для любых точек снимка координаты X , Y и Z , если известна хотя бы одна опорная точка на снимке. Для этого необходимо вычислить Δx_i по формуле (17) и ΔY – по формуле (18).

Прибавив к Y' точки с известными координатами ΔY , получим значения отстояний Y' для любых точек снимка и по формулам (8) вычислим координаты X и Z .

Следует отметить, что в работах [1; 3] и в данной научной работе рассматриваются только плоские здания. Если здание имеет сложную конфигурацию, целесообразно выполнять съемку таким образом, чтобы смежные снимки перекрывались на 60%, и использовать методику обработки стереоскопической пары снимков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева, А.А. Рекомендуемый алгоритм определения элементов внешнего ориентирования цифрового снимка, полученного с помощью обзорной камеры электронного тахеометра / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, Д.О. Волков // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 213–219.
2. Михеева, А.А. Фотограмметрия. Наземная стереофотограмметрическая съемка : учеб.-метод. комплекс / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 88 с.
3. Михеева, А.А. Рекомендуемый алгоритм получения плана фасада здания с помощью обзорной камеры электронного тахеометра / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, Д.О. Волков // Вестник Полоц. гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 120–127.
4. Техническая документация компании Artina. Светочувствительная матрица МТ9Р031.
5. Сердюков, В.М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве / В.М. Сердюков. – М. : Недра, 1977. – 245 с.
6. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск : БелНИЦЗЕМ, 2003. – 78 с.

Поступила 30.10.2019

CHECKING THE POSSIBILITY OF CREATING A BUILDING FRONT MAKING THE AXIS OF THE PHOTOGRAMMETRIC GRID SYSTEM PARALLEL TO THE AXIS OF THE FALSE GRID SYSTEM

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV

The paper reveal the algorithm of creating a building front while making the axis of the photogrammetric grid system parallel to the axis of the false grid system. In this case the transition formulae are simpler than while creating the building fronts, while the Y axis of the photogrammetric grid system is perpendicular to the building plane. However, in the case under consideration there is a problem of defining the distance from Y' to the determinable points. The preference should be given to the case when one needs to define the angle between the building front plane and the XY axis of the false coordinates system using the checkpoints on the building front. In this case one can create the building panorama as well as the plan of the building front in the 1:500 scale or less at the distance of up to 30 meters.

УДК 528.3

ОБОСНОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ПОЛЮСНЫМ МЕТОДОМ

канд. техн. наук, доц. С.Д. КРЯЧОК;

Л.С. МАМОНТОВА; Ю.В. ЩЕРБАК

(Черниговский национальный технологический университет, Украина)

Обоснована точность определения площадей земельных участков полюсным методом. Получена обобщенная формула расчета средней квадратической погрешности площади по результатам измерений в полюсной сети, проложенной по границам участка, с полюсом, расположенным в середине сети. Формула конкретизирована для полюсных сетей в виде треугольника, прямоугольника, квадрата и пятиугольника с равными сторонами и полюсом, расположенным в центре участка. Приведены примеры расчета точности площадей земельных участков, полученных полюсным методом.

Ключевые слова: площадь земельного участка, точность определения площади, полюсная геодезическая сеть.

Применение полюсного метода для определения площадей земельных участков (рисунок 1) выполняется для фигуры в виде замкнутой ломаной линии, называемой ходовой линией [1]. Центром фигуры является полюс Р. В сети проводят измерения базиса b и горизонтальных углов β_i . Имея известные координаты начального пункта и дирекционный угол одного из направлений, можно определить координаты остальных пунктов сети. Для этого по теореме синусов вычисляют длины сторон треугольников и определяют дирекционные углы сторон ходовой линии. Существуют полюсные сети в виде спирали треугольников [1].

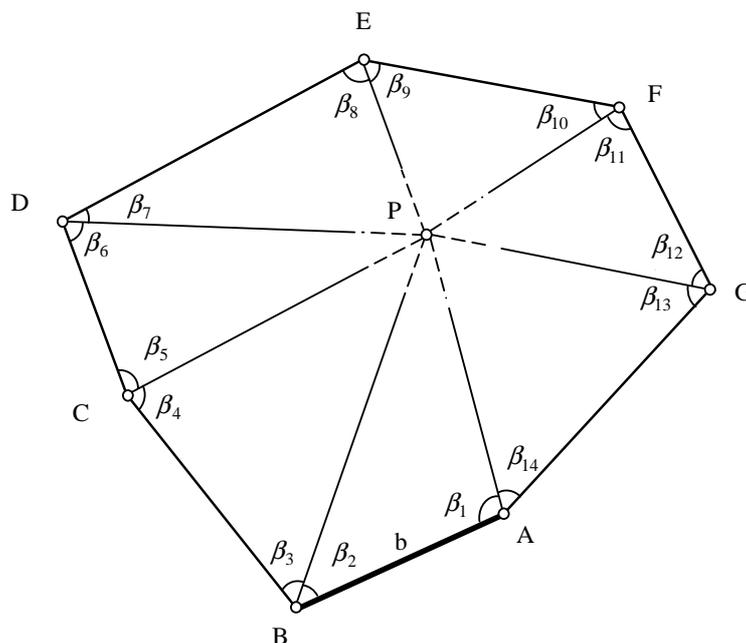


Рисунок 1. – Схема полюсной сети

Для построения плановой геодезической сети полюсным методом необходимо на местности выбрать полюс Р (крест церкви, молниеотвод заводской трубы, телевизионную (радио) антенну, антенну сотовой связи, опору ЛЭП или другие высотные сооружения). Расстояния от точек ходовой линии до полюса не должны превышать 2 км [1]. Пункты закрепляют так, чтобы была видимость на заднюю и переднюю точки ходовой линии и полюс, а измеренные горизонтальные углы были в пределах от 30 до 150° [1].

Анализ существующих классических методов построения плановых геодезических сетей позволяет сделать следующие *выводы*: преимущество полигонометрии в том, что ходы прокладывают по удобному маршруту, однако необходимо проводить измерения всех длин линий между пунктами сети; пре-

имуществом триангуляции является то, что ее сеть не нуждается в линейных измерениях, кроме одной или нескольких базисных сторон, но недостаток ее в том, что в каждом пункте нужно измерять от трех и более направлений [1].

В полюсном методе объединены положительные особенности [1]:

- в полигонометрии – закрепление пунктов на удобном маршруте с учетом условий местности;
- в триангуляции – принцип определения длин сторон по теореме синусов, без дополнительных измерений в полевых условиях;
- в угловых засечках – измерение только двух углов в каждом треугольнике.

Исследовательская часть. Неисследованной частью является расчет точности определения площадей земельных участков полюсным методом. С этой целью предложены следующие подходы.

Пусть ходовая линия полюсной сети имеет форму треугольника (рисунок 2). Земельные участки такой формы – редкость. Например, в центре участка расположена высокая мачта, а в точках А, В, С находятся ее растяжки. Это одна из самых простых фигур, с которой стоит начать исследования точности определения площадей земельных участков.

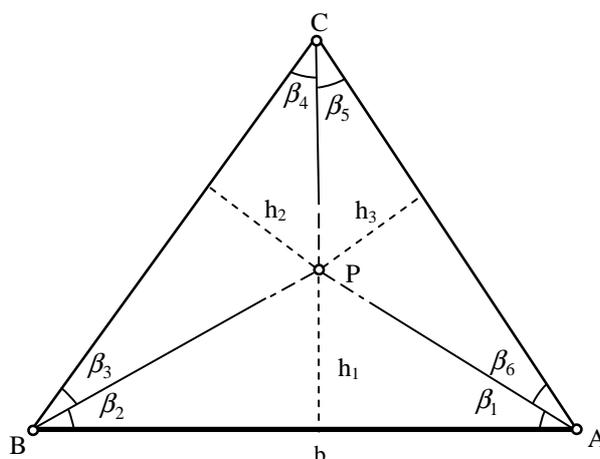


Рисунок 2. – Полюсная сеть в форме треугольника

Площади треугольников АВР, ВСР, АСР (см. рисунок 2) равны соответственно

$$S_1 = \frac{b \cdot h_1}{2} = \frac{b \cdot AP \sin \beta_1}{2} = \frac{b^2 \sin \beta_1 \sin \beta_2}{2 \sin(\beta_1 + \beta_2)}, \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{b^2 \sin^2 \beta_1 \sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \beta_4)}{2 \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_4}, \quad (2)$$

$$S_3 = \frac{b^2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin \beta_5 \sin(\beta_5 + \beta_6)}{2 \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin \beta_6}. \quad (3)$$

Площадь всей фигуры равна

$$P_3 = S_1 + S_2 + S_3. \quad (4)$$

На рисунке 3 показаны полюсные сети в форме четырехугольника и пятиугольника.

Общая площадь пятиугольника равна

$$P_5 = \frac{b^2}{2} \left[\frac{\sin \beta_1 \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \beta_4)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_4} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin \beta_5 \sin(\beta_5 + \beta_6)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin \beta_6} \right] + \left[\frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin^2 \beta_5 \sin \beta_7 \sin(\beta_7 + \beta_8)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin^2 \beta_6 \sin \beta_8} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin^2 \beta_5 \sin^2 \beta_7 \sin \beta_9 \sin(\beta_9 + \beta_{10})}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin^2 \beta_6 \sin^2 \beta_8 \sin \beta_{10}} \right]. \quad (5)$$

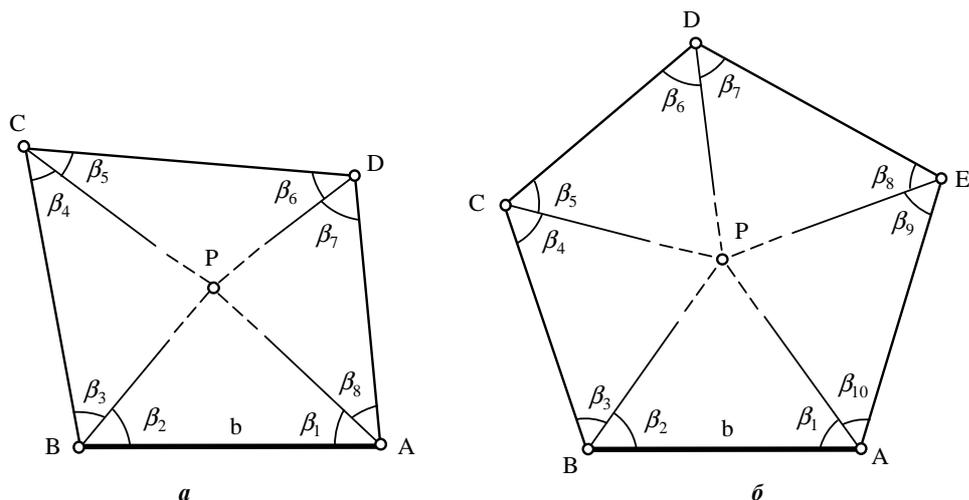


Рисунок 3. – Полусная сеть в форме: а – четырехугольника; б - пятиугольника

Сравнение формул (1)–(5) позволяет установить закономерность определения площадей любых многоугольников.

Кроме того, из рисунка 3, а видно, что треугольник АВР тоже образует треугольную полусную сеть, два треугольника АВР и ВСР образуют четырехугольную полусную сеть. В этом случае полюс Р находится на пункте ходовой линии (на границе участка). Такие построения могут иметь место. В этом случае необходимо определить по одной стороне в первом и последнем треугольниках.

Для вычисления средней квадратичной погрешности (СКП) определения площади участка по результатам измерений полусным методом необходимо найти частные производные площади по отдельным аргументам, используя выражение (5):

$$\frac{dP_n}{db} = 2P_n \frac{1}{b}, \quad (6) \quad \frac{dP_n}{d\beta_2} = (S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_n) \operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2) - S_1 \operatorname{ctg}\beta_2, \quad (8)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_1} = (S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_n) [\operatorname{ctg}(\beta_1 + \beta_2) - \operatorname{ctg}\beta_1], \quad (7) \quad \frac{dP_n}{d\beta_3} = S_2 \operatorname{ctg}(\beta_3 + \beta_4) + (S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_n) \operatorname{ctg}\beta_3, \quad (9)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_4} = S_2 \operatorname{ctg}(\beta_3 + \beta_4) - (S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_n) \operatorname{ctg}\beta_4, \quad (10)$$

$$\dots$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_{(2i-1)}} = S_i \operatorname{ctg}(\beta_{2i-1} + \beta_{2i}) + (S_i + 2S_{i+1} + \dots + 2S_n) \operatorname{ctg}\beta_{(2i-1)}, \quad (11)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_{2i}} = S_i \operatorname{ctg}(\beta_{2i-1} + \beta_{2i}) - (S_i + 2S_{i+1} + \dots + 2S_n) \operatorname{ctg}\beta_{2i}, \quad (12)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_{2n-1}} = S_n \operatorname{ctg}(\beta_{2n-1} + \beta_{2n}) + S_n \operatorname{ctg}\beta_{2n-1}, \quad (13) \quad \frac{dP_n}{d\beta_{2n}} = S_n \operatorname{ctg}(\beta_{2n-1} + \beta_{2n}) - S_n \operatorname{ctg}\beta_{2n}. \quad (14)$$

Необходимо учесть корреляционные связи между четными и нечетными номерами горизонтальных улов, расположенных при каждой точке ходовой линии (см. рисунок 2, рисунок 3). Такие углы измеряются способом круговых приемов. В этом случае коэффициент корреляции равен $-0,5$ [2].

Поскольку не удалось значительно упростить общую формулу по определению СКП площади полусным методом, то она приводится в таком виде:

$$m_{P_n}^2 = 4P_n^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} \left[\sum_{i=1}^{2n} \left(\frac{dP_n}{d\beta_i} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{dP_n}{d\beta_{2i}} \right) \left(\frac{dP_n}{d\beta_{2i+1}} \right) \right], \quad (15)$$

где P_n – площадь полусной сети, состоящая из n треугольников; m_b – СКП определения длины базиса b , m_{β} – СКП измерения горизонтальных углов, $\rho = 206265''$, i – текущий номер угла.

Упростить формулу (15) можно для фигур с равными сторонами и полюсом Р, находящимся в центре фигуры (см. рисунок 2). Тогда внутренние треугольники будут равнобедренными. Так как сумма

внутренних углов многоугольника равна $180^\circ (n-2)$, а число измеренных углов в полюсной сети равно $2n$, то величина каждого угла составит

$$\beta = \frac{180^\circ (n-2)}{2n}. \quad (16)$$

Тогда для полюсной сети в форме треугольника $\beta = 30^\circ$, $\beta_1 + \beta_2 = 2\beta = 60^\circ$, а $\text{ctg} 30^\circ = \sqrt{3}$, $\text{ctg} 60^\circ = \sqrt{3}/3$. Площади внутренних треугольников $S_1 = S_2 = S_3 = S = P_3/3$. Тогда формула (15) для равносторонней треугольной полюсной сети с полюсом, расположенным в центре сети, упростится

$$m_{P_3} = \sqrt{4P_3^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{320}{3} S^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} = 2P_3 \sqrt{\frac{m_b^2}{b^2} + \frac{80}{27} \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \quad (17)$$

Земельные участки во многих случаях имеют форму прямоугольника, или конфигурацию границ, близкую к нему. Поэтому стоит остановиться на прямоугольной полюсной сети (рисунок 4) с размерами сторон ходовой линии a и b . Для дальнейших рассуждений необходимо ввести коэффициент удлинения k , характеризующий отступление прямоугольника от квадрата ($b > a$):

$$k = \frac{b}{a}. \quad (18)$$

Из рисунка 4 видно, что

$$\text{ctg} \beta_1 = \frac{b}{a} = k, \quad (19)$$

$$\text{ctg} \beta_2 = \frac{a}{b} = \frac{1}{k}. \quad (20)$$

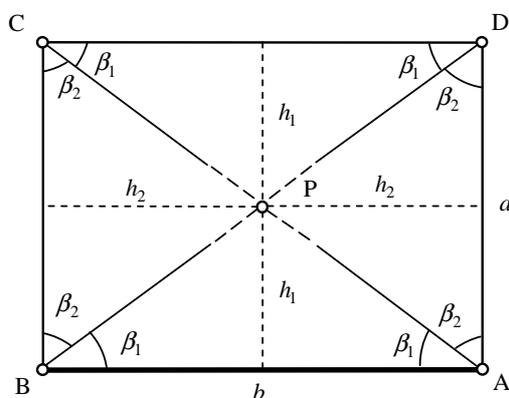


Рисунок 4. – Полюсная сеть в форме прямоугольника

Известно, что

$$\text{ctg} 2\beta = \frac{\text{ctg}^2 \beta - 1}{2 \text{ctg} \beta}. \quad (21)$$

Тогда с учетом формул (19)–(21) $\text{ctg}(\beta_{2i-1} + \beta_{2i})$ в формулах частных производных (7)–(14) будут равны

$$\text{ctg} 2\beta_1 = \frac{k^2 - 1}{2k}, \quad (22)$$

$$\text{ctg} 2\beta_2 = \frac{1 - k^2}{2k}. \quad (23)$$

Площади внутренних треугольников (см. рисунок 4), образованных сторонами прямоугольника и направлениями на полюс, с учетом коэффициента удлинения k равны

$$S = S_i = \frac{b \cdot h_1}{2} = \frac{a \cdot h_2}{2} = \frac{a^2 k}{4}. \quad (24)$$

Тогда значения частных производных по измеренным углам прямоугольной полюсной сети составят

$$\frac{dP_4}{d\beta_1} = \frac{7a^2(k^2+1)}{8}, \quad (25) \quad \frac{dP_4}{d\beta_5} = \frac{a^2(7k^2-1)}{8}, \quad (29)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_2} = \frac{a^2(-5k^2+7)}{8}, \quad (26) \quad \frac{dP_4}{d\beta_6} = \frac{-a^2(5k^2+1)}{8}, \quad (30)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_3} = \frac{a^2(-k^2+11)}{8}, \quad (27) \quad \frac{dP_4}{d\beta_7} = \frac{a^2(-k^2+3)}{8}, \quad (31)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_4} = \frac{-a^2(k^2+9)}{8}, \quad (28) \quad \frac{dP_4}{d\beta_8} = \frac{-a^2(k^2+1)}{8}. \quad (32)$$

С учетом формул (15), (25)–(32) и значения площади прямоугольника $P_{II} = a^2k \left(a = \sqrt{\frac{P_{II}}{k}} \right)$ СКП площади полюсной сети в форме прямоугольника и полюсом в центре сети определяется по формуле

$$m_{II} = P_{II} \sqrt{4 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_{\beta}^2}{64\rho^2} \left(156k^2 + 168 + \frac{236}{k^2} \right)}. \quad (33)$$

Поскольку существует ограничение на величины углов $\beta \leq 30^\circ$, то значение коэффициента удлинения не должно превышать значения $k = \text{ctg} 30^\circ = \sqrt{3}$.

Для полюсной сети в форме квадрата ($k = b/a = a/a = 1$) из формулы (33) следует значение СКП определения площади:

$$m_K = a^2 \sqrt{4 \frac{m_a^2}{a^2} + 8,75 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}} = P_K \sqrt{4 \frac{m_a^2}{P_K} + 8,75 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}}. \quad (34)$$

Для полюсной сети с пятью равными сторонами ходовой линии и полюсом в центре сети (см. рисунок 3, б) величина угла по формуле (16) для $n=5$ составит $\beta = 54^\circ$, а $\text{ctg} 54^\circ = 0,7265$, $\text{ctg}(2 \cdot 54^\circ) = -0,3249$. В этом случае и для одинаковых по величине площадей внутренних треугольников $S_i = S$, СКП определения площади по формуле (15) составит

$$m_{P_5} = \sqrt{4P_5^2 \frac{m_b^2}{b^2} + 211,2S^2 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}}. \quad (35)$$

Подсчитано, что вклад коррелированных членов в формуле (35) в коэффициент 211,2 составляет всего 18,8. Тогда остаточный коэффициент равен 192,4. Процент отвергнутой части коэффициента по отношению к сохраненной составил $(18,8/192,4) \cdot 100\% = 9,8\%$. Понятно, что с учетом этого обстоятельства, можно утверждать, что для $S = P_5/5$ формула (35) будет иметь вид

$$m_{P_5} \approx \sqrt{4P_5^2 \frac{m_b^2}{b^2} + 192,4 \cdot S^2 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}} = P_5 \sqrt{4 \frac{m_b^2}{b^2} + 7,696 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}} \approx \sqrt{4P_5^2 \frac{m_b^2}{b^2} + 192,4 \cdot S^2 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}} = P_5 \sqrt{4 \frac{m_b^2}{b^2} + 7,696 \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2}}. \quad (36)$$

Для полюсной сети в виде треугольника с равными сторонами ходовой линии и полюсом в центре сети вклад коррелированных членов в значение названного коэффициента составляет 43%.

Таким образом, увеличение числа сторон ходовой линии ведет к уменьшению процента вклада коррелированных членов в слагаемое формулы для расчета СКП площади, который отвечает за точность измерения горизонтальных углов полюсной сети. Поэтому формулу (15) можно представить в сокращенном виде, что соответствует точности определения площади полюсного построения, начиная с пятиугольника:

$$m_{P_n}^2 \approx 4P_n^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_{\beta}^2}{\rho^2} \left[\sum_{i=1}^{2n} \left(\frac{dP_n}{d\beta_i} \right)^2 \right]. \quad (37)$$

Рассмотрим применение полученных формул для определения СКП площадей полюсных сетей.

Пусть имеется земельный участок площадью 2,0 гектара для ведения личного крестьянского хозяйства [3]. В случае, когда участок имеет форму квадрата, его сторона составит $a = \sqrt{20000} \approx 141$ м.

Если для определения длины базиса применить топографический светодальномер СТ-5 «Блеск» и теодолит 3Т5КП, то $m_a = 10 \text{ мм} + 5 \text{ мм} \cdot 0,141 = 10,7 \text{ мм}$, а $m_b = 5''$. По формуле (34) $m_K = 3,4 \text{ м}^2$.

Согласно [4], учетной единицей площади в сельской местности является 100 м^2 . Тогда для доверительной вероятности $P = 0,95$ погрешность определения указанной площади полюсным методом составит $\Delta P = 2m_K = 2 \cdot 3,4 = 6,8 \text{ м}$, что значительно меньше приведенной учетной единицы.

Если участок имеет форму прямоугольника, для предельного значения $k = \sqrt{3}$, длины базиса $b = ka = k \cdot \sqrt{P_{II}/k} = \sqrt{kP_{II}} = \sqrt{\sqrt{3} \cdot 20000} = 186,1 \text{ м}$, $m_b = 10 \text{ мм} + 5 \text{ мм} \cdot 0,186 = 10,93 \text{ мм}$, по формуле (33) значения СКП площади участка составит $m_{II} = 2,8 \text{ м}^2$.

Для пятиугольника с равными сторонами и полюсом в центре сети площадь отдельного треугольника равна $S = P_5/5$. С другой стороны, площадь отдельного треугольника полюсной сети с равными сторонами b ходовой линии и полюсом в центре сети составит следующую величину:

$$S = \frac{b}{2}h = \frac{b^2}{4} \operatorname{tg} \beta, \quad (38)$$

а сторона ходовой линии

$$b = 2 \sqrt{\frac{S}{\operatorname{tg} \beta}}. \quad (39)$$

Для $n = 5$ из (16) $\beta = 54^\circ$, а из (39) для $S = P_5/5$ длина базиса $b = 107,8 \text{ м}$.

Тогда $m_b = 10 \text{ мм} + 5 \text{ мм} \cdot 0,108 = 10,54 \text{ мм}$, и для $P = 20000 \text{ м}^2$ согласно (36) $m_{P_5} = 4,1 \text{ м}^2$.

Для полюсной сети в форме треугольника с полюсом в центре сети: из (16) угол $\beta = 30^\circ$, сторона ходовой линии для $S = P_3/3$ и $P = 20000 \text{ м}^2$; из (39) $b = 214,9 \text{ м}$; $m_b = 10 \text{ мм} + 5 \text{ мм} \cdot 0,2149 = 11,07 \text{ мм}$; из (17) $m_{P_3} = 2,7 \text{ м}^2$.

Заключение. На основании проведенного исследования получена обобщенная формула расчета средней квадратической погрешности площади земельного участка по результатам измерений в полюсной сети в виде многоугольника с полюсом, расположенным в середине сети. Формула конкретизирована для полюсных сетей в виде треугольника, прямоугольника, квадрата и пятиугольника с равными сторонами и полюсом, расположенным в центре участка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романчук, С.В. Геодезія: навчальний посібник / С.В. Романчук, В.П. Кирилук, М.В. Шемякін. – К. : Центр учбової літератури, 2008. – 296 с.
2. Войтенко, С.П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів : навчальний посібник / С.П. Войтенко. – К. : КНУБА, 2003. – 216 с.
3. Земельний кодекс України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://urist-ua.net/кодекси/земельний_кодекс_україни/.
4. Барановський, В.Д. Топографо-геодезичне забезпечення ведення державного земельного кадастру. Визначення площ територій / В.Д. Барановський, Ю.О. Карпінський, А.А. Ляшенко ; за заг. ред. Ю.О. Карпінського. – К. : НДІГК, 2009. – 92 с.

Поступила 07.08.2019

JUSTIFICATION OF ACCURACY FOR DETERMINATION OF AREA OF LAND PLOTS BY THE POLAR METHOD

S. KRYACHOK, L. MAMONTOVA, Y. SHCHERBAK

The substantiation of the accuracy of determining the areas of land plots by the pole method was performed. A generalized formula for calculating the mean square error of the area was obtained from measurements in a pole network. The pole network is laid along the boundaries of the plot. The pole is located in the middle of the network. The formula clarified for pole networks in the form of a triangle, a rectangle, a square and a pentagon with equal sides and a pole located in the center of the plot. Examples of calculating the accuracy of land areas obtained by the pole method are given.

Keywords: land area, area accuracy, pole geodetic network.

УДК 631.474

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ПОЧВ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

д-р с.-х. наук Т.Н. МЫСЛЫВА; О.А. КУЦАЕВА

(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)

Представлены результаты использования методов геостатистического анализа для оценки характера пространственного распределения данных о содержании в почве гумуса, подвижных фосфора и калия, а также рН почвенного раствора посредством применения инструментов модуля «Пространственная статистика» ArcGIS версии 10.5. Установлено наличие достоверной кластеризации исследуемых показателей, поскольку величина индекса Морана колеблется от 0,197827 до 0,360388; величина фактического общего индекса Getis-OrdG превышает его теоретическое значение, а величина z-оценки > 2,58. Максимальным количеством пространственных выбросов с высокими и низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве подвижных фосфора и калия – 344 и 369 соответственно. В целом количество кластеров с низкими значениями в 1,3 раза превышает количество кластеров с высокими значениями.

Ключевые слова: геостатистический анализ, почва, кластеризация, индекс Морана, Getis-OrdG, Getis-OrdGi*.

Введение. Мониторинг состояния земельных ресурсов, оценка и прогноз их изменений под воздействием антропогенных и природных факторов – неотъемлемая часть комплекса мероприятий по рациональному использованию земель, сохранению и воспроизводству почвенного плодородия [1]. Выявление характеристик пространственной структуры агрохимических и физико-химических показателей может стать основой для оценки плодородия почв и базой для разработки рациональной политики управления окружающей средой в условиях интенсификации аграрного производства и усиления антропогенного прессинга на биосферу. Исходя из этого существует потребность в получении адекватной информации о пространственно-временном распределении агрохимических свойств почвы как в пределах отдельных регионов и природно-территориальных комплексов, так и в пределах локальных и микролокальных территорий, что особенно важно при внедрении элементов системы точного земледелия [2]. Геостатистика является эффективным методом изучения пространственного распределения характеристик почвы, их несогласованности и уменьшения дисперсии ошибок оценки и затрат на выполнение агрохимических исследований [3–5]. Одним из возможных вариантов применения методов геопространственной статистики для целей сельскохозяйственного производства и землеустройства может стать анализ пространственного распределения агрохимических и физико-химических свойств почв земель сельскохозяйственного назначения. Однако, несмотря на достаточно широкое применение в различных отраслях, методы геопространственного анализа, впрочем, как и методы геостатистического анализа в целом, по-прежнему не нашли широкого использования в аграрной сфере и землеустройстве Беларуси.

Цель и методика исследования. Цель данного исследования – установление возможности применения методов геопространственного анализа для оценки неоднородности пространственного распределения агрохимических и физико-химических свойств почвы в пределах землепользования РУП «Учхоз БГСХА». Геостатистический анализ данных выполнялся с помощью функциональных возможностей наборов инструментов «Анализ структурных закономерностей» и «Расчет кластеризации» модуля «Пространственная статистика» программного продукта ArcGIS версии 10.5. Для анализа использовались данные, полученные из материалов агрохимического обследования территории РУП «Учхоз БГСХА», выполненного в 2018 году УКПП «Могилевская областная проектно-изыскательская станция агрохимизации». Общая площадь обследованной территории составила 8342,1 га. Почвенный покров представлен преимущественно дерново-подзолистыми супесчаными на водно-ледниковых супесях и дерново-подзолистыми суглинистыми почвами на лессовидных суглинках [6].

Шейп-файл с размещением земельных участков в пределах территории выполнения исследования создан в среде ГИС ArcGIS версии 10.5 по результатам оцифровки планово-картографических материалов, полученных при проведении агрохимического обследования территории хозяйства в 2018 году.

Глобальный индекс Морана (I) рассчитывали по следующей формуле (1):

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]} \quad (1)$$

В формуле (1) n – количество единиц в выборке; w_{ji} – вес пространственной связи между i -той и j -той единицей выборки; y_i – атрибутивное значение для i -той единицы выборки; \bar{y} – выборочное среднее значение атрибута.

Величину индекса Getis-OrdGi* рассчитывали по формуле (2):

$$\text{Getis-OrdGi}^* = \frac{\sum_{j=i}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j}\right)^2}{n-1}}}, \quad (2)$$

где x_j – атрибутивное значение объекта наблюдений; j ; w_{ij} – пространственный вес между объектами i и j ; n – общее число объектов.

Основная часть. Для исследования пространственного распределения данных о содержании в почве гумуса, подвижных фосфора и калия и pH почвенного раствора посредством инструментов модуля «Пространственная статистика» определяли: *минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства*, дающие возможность подобрать оптимальную величину окрестности поиска при пространственном моделировании; *глобальный индекс Морана*, позволяющий определить, имеет ли место явление кластеризации по отношению к атрибутивным данным, каковыми в нашем случае являются сведения о физико-химических и агрохимических свойствах почвы; *общий индекс Getis-OrdG* для оценки общей структуры и тренда геоданных, а также степени кластеризации высоких и/или низких значений выборки; *индекс Getis-OrdGi**, позволяющий установить наличие кластеризации данных с высокими и низкими значениями.

Для определения величины фиксированного расстояния или минимального расстояния окрестности поиска соседства между значениями того или иного почвенного показателя использовали инструмент «Пошаговая пространственная автокорреляция», в диалоговом окне которого задавали величину начального (расстояние, на котором необходимо начать анализ пространственной автокорреляции) и приращенного (расстояние, на которое необходимо увеличивать начальное расстояние при каждой последующей итерации) расстояний. В нашем случае величина расстояния, на котором необходимо начать анализ пространственной автокорреляции, составила 550 м, тогда как величина приращения, установленная эмпирическим путем, колебалась от 50 м для содержания в почве pH почвенного раствора до 100 м для содержания в почве гумуса и до 250 м для содержания в почве подвижных фосфора и калия. При выполнении пошаговой пространственной автокорреляции выделялись десять интервалов расстояний, равномерно распределенных по всему экстенду. Для каждого интервала рассчитывался глобальный индекс Морана и интервал, для которого данный индекс будет наибольшим, рекомендовался как оптимальное расстояние для окрестности поиска. В результате получали график, на котором отмечены минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства (рисунок 1).

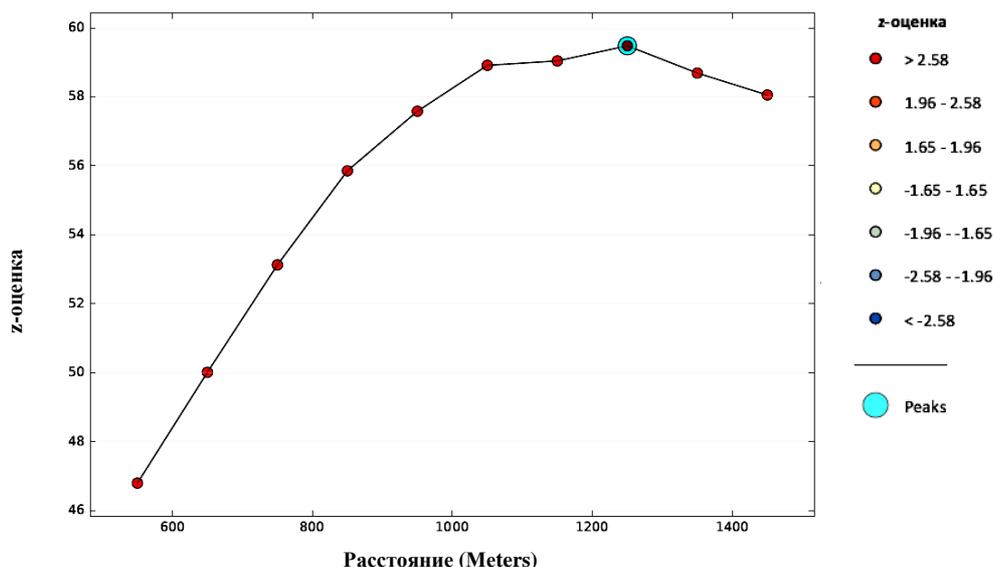


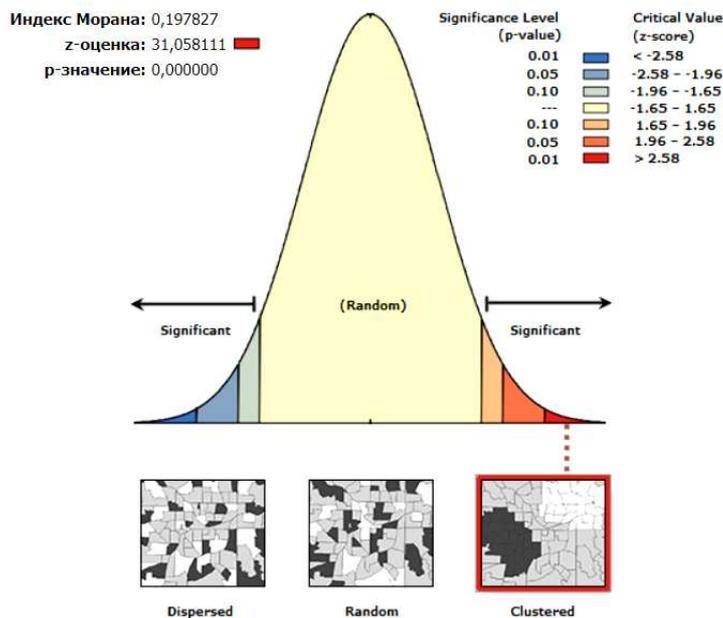
Рисунок 1. – Графическая интерпретация величины минимального расстояния окрестности поиска соседства между значениями содержания гумуса в почве

В таблице 1 приведены результаты определения минимального расстояния окрестности поиска ближайшего соседства для всех рассматриваемых показателей. Полученные результаты целесообразно использовать при подборе параметров модели вариограммы при пространственном моделировании свойств почвы интерполяцией методом кригинга, а также при установлении величины лага.

Таблица 1. – Минимальное и максимальное расстояния окрестности поиска ближайшего соседства

Название показателя	Расстояние окрестности поиска, м		Минимальное расстояние окрестности поиска		Максимальное расстояние окрестности поиска	
	минимальное	максимальное	дисперсия	z-оценка	дисперсия	z-оценка
pH _{KCl}	700	850	0,000067	28,841475	0,000045	29,273034
Гумус, %	1050	1250	0,000030	59,854804	60,061236	0,000022
P ₂ O ₅ , мг/кг	2550	2550	0,000006	89,678997	0,000006	89,678997
K ₂ O, мг/кг	2050	2050	0,000009	71,995204	0,000009	71,995204

Для того чтобы определить, имеет ли место явление кластеризации по отношению к атрибутивным данным, каковыми в нашем случае являются сведения о различных показателях почвы, рассчитывалась величина глобального индекса Морана. Глобальный индекс Морана для нормально распределенных данных лежит в диапазоне от -1 до $+1$. Величина индекса $+1$ означает детерминированную прямую зависимость – группировку схожих (низких или высоких) значений – и свидетельствует о наличии кластеризации данных; величина индекса 0 означает абсолютно случайное распределение данных; величина индекса -1 означает детерминированную обратную зависимость – идеальное перемешивание низких и высоких значений, напоминающее шахматную доску, что свидетельствует о равномерном распределении данных. Данный индекс является мерой пространственной автокорреляции и характеризует наличие или отсутствие пространственной автокорреляции геоданных. По результатам его определения генерируется графический отчет, в котором приводится величина глобального индекса Морана, рассчитанная для выборки по значениям атрибута, а также величина z-оценки, позволяющие судить о характере распределения данных (рисунок 2).



Заданная z-оценка 31.0581109664, вероятность меньше 1%, что полученный тип распределения - кластеризован - может быть результатом случайного выбора.

Рисунок 2. – Графическая интерпретация величины глобального индекса Морана, рассчитанной для pH_{KCl} почвы

Для исследуемых показателей величина глобального индекса Морана колеблется в пределах от 0,197827 до 0,360388, следовательно, данные об агрохимических и физико-химических свойствах почвы в пределах исследуемой территории распределены не случайно и кластеризованы. Поскольку величина

z-оценки во всех случаях превышает 2,58, то с вероятностью 99% можно утверждать, что кластеризованный тип распределения данных не является случайным (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты определения величины глобального индекса Морана

Название показателя и объем выборки	Фактический глобальный индекс Морана	Ожидаемый глобальный индекс Морана	Дисперсия	z-оценка	Тип распределения данных
pH _{KCl} , n = 1622	0,197827	-0,000617	0,000041	31,058111	Кластеризованы с вероятностью 99%
Гумус, %, n = 1636	0,277465	-0,000612	0,000019	63,163917	
P ₂ O ₅ , мг/кг, n = 1630	0,204838	-0,000614	0,000005	91,269389	
K ₂ O, мг/кг, n = 1634	0,221134	-0,000612	0,000008	79,800517	

Следует также отметить, что при расчете глобального индекса Морана учитывались не координаты пространственных данных, а их атрибутивные значения, каковыми являются значения содержания в почве гумуса, фосфора, калия и величины pH.

Степень кластеризации значений для каждой выборки данных определяли посредством вычисления общего индекса Getis-OrdG, с помощью которого оценивали общую структуру и тренд геоданных (таблица 3).

Таблица 3. – Результаты определения величины общего индекса Getis-OrdG

Название показателя и объем выборки	Фактический общий индекс Getis-OrdG	Ожидаемый общий индекс Getis-OrdG	z-оценка	p-значение	Тип кластеризации данных
pH _{KCl} , n = 1622	0,018350	0,018242	4,463522	0,000008	Кластеризация высоких значений
Гумус, %, n = 1636	0,038475	0,036907	10,536313	0,000000	
P ₂ O ₅ , мг/кг, n = 1630	0,132254	0,126622	6,587257	0,000000	
K ₂ O, мг/кг, n = 1634	0,090315	0,087229	5,583397	0,000000	

По результатам определения величины фактического общего индекса Getis-OrdG установлено, что во всех случаях имеет место его превышение над ожидаемым значением. Судя по величине z-параметра, которая превышает 2,58, с вероятностью 99% можно утверждать, что установленный сильно кластеризованный тип распределения данных с высокими значениями является не случайным, о чем свидетельствует и величина p-значения, не превышающая 0,000008 при допустимом значении 0,01. В качестве параметра концептуализации пространственных отношений был выбран *fixed_distance_band*, при котором каждый объект анализировался в контексте соседних объектов в пределах указанного порогового расстояния (см. таблицу 1), за пределами которого влияние соседних объектов не учитывалось.

Анализ «горячих точек» является качественным методом исследования и инструментом предварительной оценки геоданных, который ориентирован на определение приоритетных областей («горячих точек») и позволяет установить наличие кластеризации данных с высокими и низкими значениями [7]. Этот метод позволяет исследовать: 1) все объекты изучаемой области данных; 2) окрестность каждого из объектов; 3) изучаемую область данных. Цель анализа – определение наличия у окрестности объекта статистически значимых отличий изучаемого атрибута от всей области значений. Если в окрестности объекта значение изучаемого атрибута выше, чем в изучаемой области, объект является «горячей точкой», если ниже – «холодной». Его выполняют посредством определения величины индекса *Getis-OrdGi** – статистического показателя, рассчитываемого для каждого пространственного объекта в наборе данных. Однако следует отметить, что при расчете индекса *Getis-Ord Gi** учитываются не атрибутивные значения отдельных объектов, а атрибутивные значения их окрестностей, которые рассчитываются для каждого объекта и сравниваются со значениями в остальной области исследований.

Полученные итоговые z-оценки и p-значения свидетельствуют о том, в какой области пространства кластеризуются объекты с высокими или низкими значениями. При этом выполняется анализ каждого объекта в контексте соседних объектов. Чтобы быть статистически значимой «горячей» либо «холодной» точкой, объект должен иметь высокое или низкое значение и быть окружен другими объектами с такими же высокими или низкими значениями. Локальная сумма значений для объекта и его соседей сравнивается пропорционально с суммой всех объектов; когда локальная сумма сильно отличается от ожидаемой локальной суммы и когда это отличие является слишком большим, чтобы быть результатом случайного процесса, получается статистически значимая z-оценка. Высокое значение z-оценки и небольшая величина p-значения для функции указывают на наличие статистически значимой «горячей точки». Низкое отрицательное значение z-оценки и небольшая величина p-значения указывают на наличие статистически значи-

мой «холодной точки». Чем выше (или ниже) показатель z , тем более интенсивна кластеризация данных. Значения z -оценки, близкие к нулю, означают, что пространственная кластеризация данных отсутствует.

В результате выполнения анализа горячих точек определены статистически значимые пространственные кластеры высоких значений (горячих точек) и низких значений (холодных точек) для всех изучаемых показателей (рисунок 3).

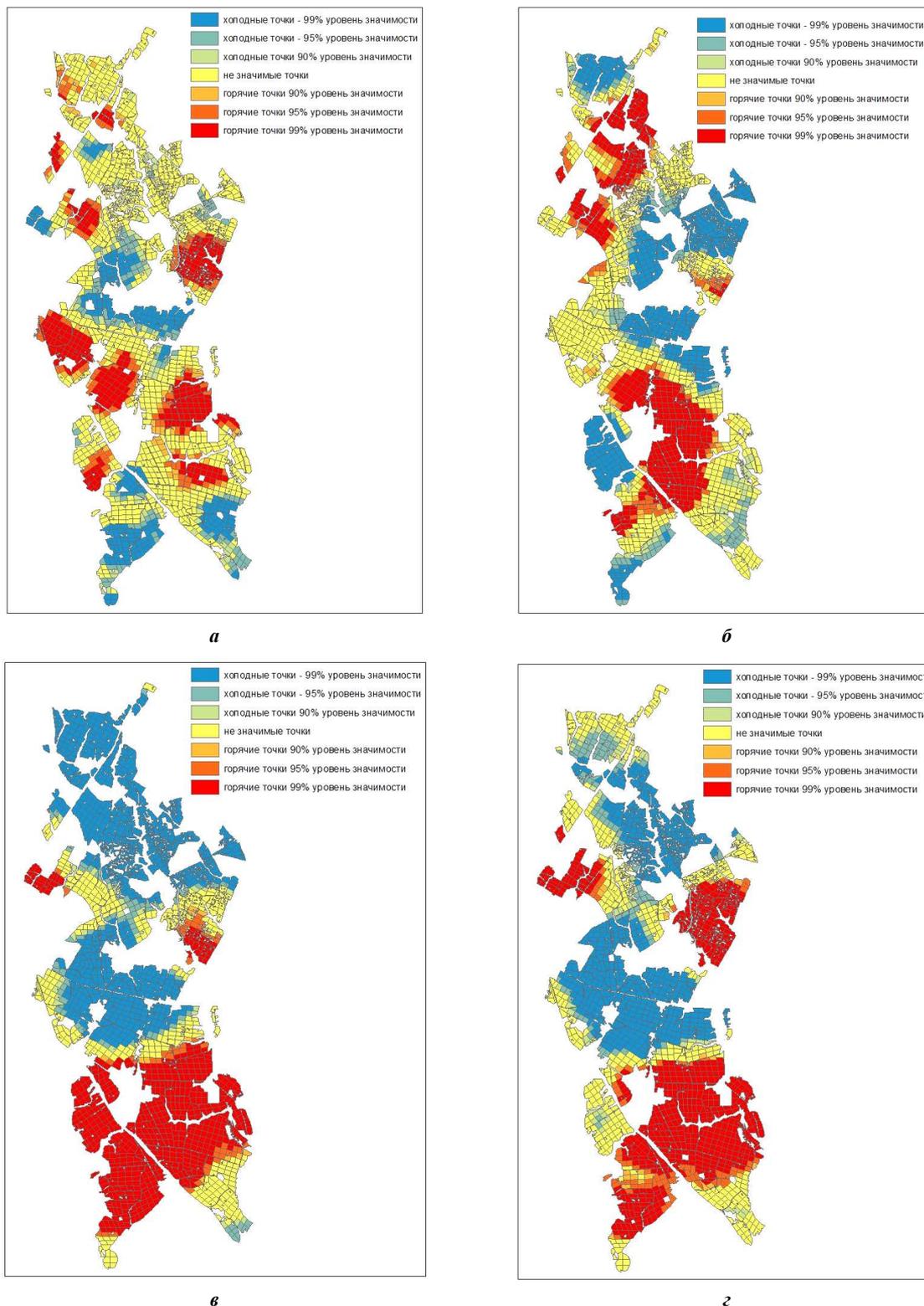


Рисунок 3. – Результаты анализа «горячих точек»:
a – pH_{KCl} ; *б* – содержание гумуса; *в* – содержание фосфора; *г* – содержание калия

Данная информация дает возможность визуально идентифицировать где, именно в пределах территории исследований будут наблюдаться максимальные и минимальные значения изучаемых свойств почв.

Анализ кластеров и выбросов идентифицирует концентрации высоких и низких значений, концентрации и пространственные выбросы данных об агрохимических и физико-химических свойствах почвы (рисунок 4). Данный анализ позволяет установить, где проходят наиболее четкие границы между контурами с высоким и низким содержанием того либо иного элемента в почве и есть ли в пределах исследуемой территории аномально высокие или аномально низкие значения показателей, которые можно отнести к пространственным выбросам.

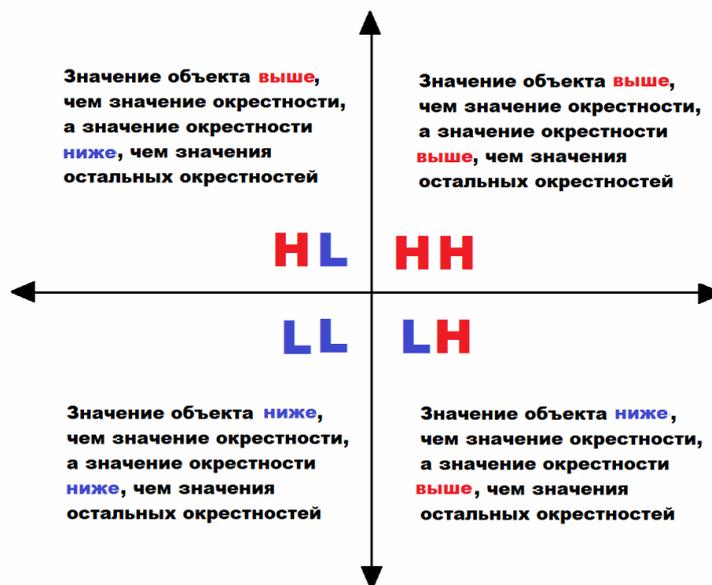


Рисунок 4. – Схема интерпретации результатов анализа кластеров и выбросов данных

Пространственные выбросы в нашем случае могут быть обусловлены как несовершенством методики отбора проб почвы, так и несовершенством применяемых методов картографирования результатов агрохимических исследований. По нашему мнению, при обнаружении участков-выбросов необходимо провести дополнительное их обследование с целью уточнения ситуации. Также необходимо исключать данные участки из набора данных при выполнении моделирования пространственного распределения того либо иного показателя посредством метода интерполяции. В частности, применение методов кригинга требует наличия данных, распределение которых нормально либо близко к нормальному. С другой стороны, наличие выбросов может быть обусловлено и объективными факторами, например, применением различных доз минеральных удобрений в пределах отдельных участков. Этим, в частности, может быть объяснена пестрота пространственного распределения подвижных фосфора и калия.

В результате выполнения анализа кластеров и выбросов по результатам оценки величины локального индекса Морана, z-оценки и p-значения установлено наличие пространственных выбросов высоких и низких значений для всех исследуемых показателей (таблица 4).

Таблица 4. – Результаты выполнения анализа кластеров и выбросов

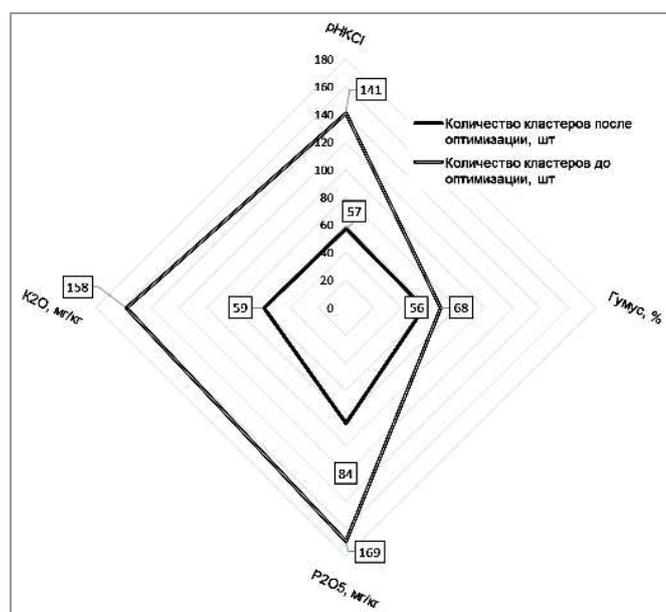
Название показателя и объем выборки	Тип кластера							
	NN-кластер		NL-кластер		LN-кластер		LL-кластер	
	1	2	1	2	1	2	1	2
pH _{KCl} , n = 1622	399	2022,49	141	718,65	106	536,79	262	1313,16
Гумус, %, n = 1636	335	1727,89	68	343,47	152	765,47	499	2565,58
P ₂ O ₅ , мг/кг, n = 1630	429	2169,89	169	843,63	175	890,89	564	2889,87
K ₂ O, мг/кг, n = 1634	409	2087,80	158	810,0	211	1068,40	472	2402,13
1 – количество рабочих участков, входящих в кластер, шт.; 2 – площадь рабочих участков, входящих в кластер, га								

Максимальным количеством пространственных выбросов с высокими и низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве подвижных фосфора и калия – 344 и 369 соответственно.

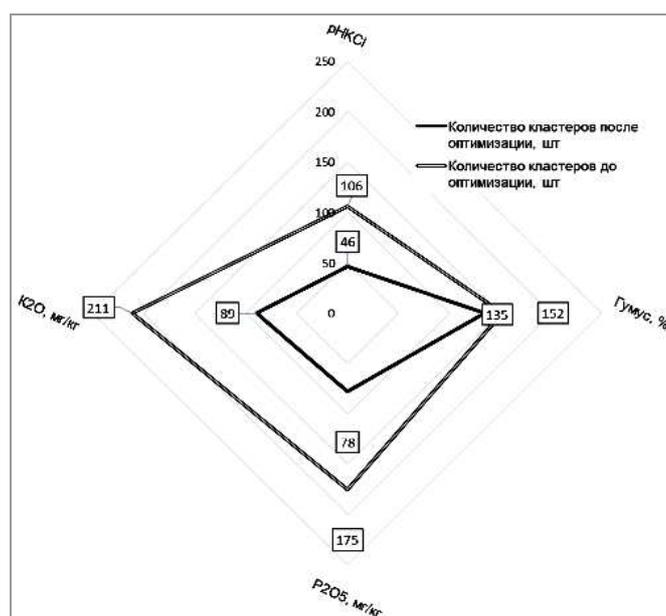
В целом количество кластеров с низкими значениями в 1,3 раза превышает количество кластеров с высокими значениями.

Для получения оптимальных результатов при определении пространственных выбросов выполнен оптимизированный анализ, при котором вычисления локального индекса Морана производилось автоматически с использованием параметров, извлеченных из характеристик входных данных. В результате оптимизации кластерного анализа количество выбросов с высокими и низкими значениями значительно сократилось (рисунок 5), а максимальное количество выбросов с высокими значениями составило 84 кластера для данных о содержании фосфора. Максимальным количеством выбросов с низкими значениями характеризуются данные о содержании в почве гумуса (135 кластеров).

При выполнении данного анализа также уточнено оптимальное расстояние окрестности поиска ближайшего соседства, которое составило, м: pH_{KCl} – 683; гумус – 1280; фосфор подвижный – 890; калий подвижный – 889. Уточненное расстояние окрестности поиска целесообразно использовать при пространственном моделировании в качестве одного из параметров модели вариограммы.



а



б

Рисунок 5. – Количество кластеров с высокими (а) и низкими (б) выбросами до и после оптимизации

Заключение. Использование геостатистического анализа данных о pH_{KCl} почвы и содержания в ней гумуса, подвижных фосфора и калия позволяет:

- выявить и математически оценить пространственное распределение агрохимических и физико-химических показателей почвы;
- изучить пространственную автокорреляцию данных и определить местоположения в области исследования с аномальными значениями;
- оценить кластеризацию данных о свойствах почвы и определить местоположения кластеров в пространстве;
- выполнить визуализацию кластеров путем построения карты локального индикатора пространственной ассоциативности;
- установить наиболее четкие границы между плодородными и мало плодородными землями и определить менеджмент-зоны с различной степенью плодородия по комплексу показателей.

Полученная информация может использоваться для осуществления внутрихозяйственных землеустроительных мероприятий при внедрении как системы точного земледелия в целом, так и отдельных ее элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мыслыва, Т.Н. Практические аспекты использования методов геопространственного анализа в землеустройстве и земельном кадастре / Т.Н. Мыслыва, О.А. Куцаева // Земля Беларуси. – 2018. – № 3. – С. 14–18.
2. Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика / В.В. Якушев. – СПб. : ФГБНУ АФИ, 2016. – 364 с.
3. Behera, S.K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical Conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid Soils of India / S.K. Behera, A.K. Shukla // Land Degrad. Dev. – 2015. – Vol. 16. – P. 71–79.
4. Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects ordinary kriging versus finite domain kriging / H. Saito [et al.] // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. – 2005. – Vol. 19. – P. 71–85.
5. Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China / L. Liu, H. Wang, W. Dai [et al.] // J. Forest. Res. – 2014. – Vol. 25 (4). – P. 867–876.
6. Мыслыва, Т.Н. Геостатистический анализ пространственного распределения агрохимических свойств почв земель сельскохозяйственного назначения / Т.Н. Мыслыва, Ю.А. Белявский // Приемы повышения плодородия почв и эффективности удобрения : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти ученых: А.И. Горбылевой, Ю.П. Сиротина и В.И. Тюльпанова. – Горки : БГСХА, 2019. – С. 101–103.
7. Дидиков, А.Е. Применение метода «Анализ горячих точек» для повышения эффективности управления предприятием и выявления значимых экологических проблем / А.Е. Дидиков, М.Е. Алексева // Экономика и экологический менеджмент. – 2015. – № 3. – С. 273–282.

Поступила 10.12.2019

GEOSTATISTICAL ANALYSIS AS A TOOL FOR EVALUATING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF AGROCHEMICAL, PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOILS OF AGRICULTURAL PURPOSES

T. MYSLYVA, O. KUTSAEVA

The results of using the methods of geostatistical analysis to assess the nature of the spatial distribution of data on the content of humus, mobile phosphorus and potassium in the soil and the pH of the soil solution applying the tools of the “Spatial statistics” module of ArcGIS version 10.5 are presented. The presence of reliable clustering of the studied indicators was established, since the value of the Moran index ranges from 0.197827 to 0.360388; the value of the actual overall Getis-OrdG index exceeds its theoretical value, and the value of the z-score is > 2.58. Data on the content of mobile phosphorus and potassium in the soil are characterized by the maximum amount of spatial emissions with high and low values – 344 and 369, respectively. In general, the number of clusters with low values is 1.3 times higher than the number of clusters with high values.

Keywords: *geostatistical analysis, soil, clustering, Moran index, Getis-OrdG, Getis-OrdGi **

УДК 528.4:332.54

ОСОБЕННОСТИ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА УСТАНОВЛЕНИЯ ГРАНИЦ АДМИНИСТРАТИВНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

М.В. МАКАРОВА

(Полоцкий государственный университет)

Дано определение и описание комплекса землеустроительных работ по нормализации и установлению границ административно-территориальных единиц Республики Беларусь. Выполнен анализ существующего кадастрового учета земель, в том числе реестра административно-территориальных единиц, действующих в сопредельных государствах (России и Украине). Подробно рассмотрен комплекс работ по установлению границ административно-территориальных единиц Российской Федерации. Отражены существующие проблемы правового регулирования, информационного и геодезического обеспечения установления границ, а также пути их решения. Исходя из представленного материала, автором сделаны определенные выводы относительно применимости данных методов в условиях Республики Беларусь.

Ключевые слова: административно-территориальные единицы, установление границ, нормализация границ, землеустройство, земельный кадастр.

Введение. Работы по нормализации и установлению границ районов и областей Республики Беларусь осуществляются Проектным институтом Белгипрозем и его дочерними предприятиями во взаимодействии с землеустроительными службами местных исполнительных комитетов с 2015 года. Основная цель нормализации и установления границ административно-территориальных единиц (далее – АТЕ) Республики Беларусь – обеспечение эффективной организации государственного регулирования и управления в области использования и охраны земель [1].

Рассматривая понятийно-терминологический аппарат, используемый в Республике Беларусь относительно границ АТЕ, следует отметить, что ни Законом [2], ни Кодексом о земле [3] не даны определения понятия границ АТЕ. Учитывая новизну данного вида землеустроительных работ для Республики Беларусь, приведем некоторые специально сформулированные термины, понятия и их определения, которые даны в [1].

Граница района (области) – линия на земной поверхности и проходящая по этой линии условная вертикальная поверхность, определяющие пространственные пределы компетенции соответствующих местных государственных органов.

Установление границы района (области) – определение на планово-картографических материалах (при необходимости на местности) точных геометрических размеров и положения границы, ее описание и координирование.

Нормализация границы района (области) – комплекс юридических, экономических, технических и экологических мероприятий, направленных на устранение недостатков в местоположении границы, в первую очередь на совмещение физической и юридической границ.

Впервые в нормативной литературе возникает одновременно несколько вариаций границ: физическая, юридическая, а также граница района в земельно-информационной системе [1].

В соответствии с законодательством об охране и использовании земель [3] нормализация и установление границ АТЕ осуществляется в порядке землеустройства. Ключевым объектом работ по нормализации и установлению границ АТЕ Республики Беларусь выступает район, который иногда называют АТЕ базового уровня. Нормализованные и установленные границы районов рассматриваются как основа для нормализации и установления границ областей, а также сельсоветов, в том числе путем корректировки границ ранее зарегистрированных АТЕ.

Точность выполнения всех графических работ должна соответствовать точности базового масштаба, а именно 1:10000 и должна составлять 0,1 мм в масштабе плана. Предельная допустимая погрешность местоположения точек границы района относительно их теоретических координат не должна превышать 5 м [1].

После установления границ районов (областей) необходимо провести государственную регистрацию соответствующих районов (областей) в реестре АТЕ и ТЕ, который создан как часть государственного земельного кадастра [3].

Основная часть. С точки зрения зарубежного опыта установления границ АТЕ, автором проанализирован ряд источников по проблемам правового, информационного, землеустроительного обеспечения управления территориями на различных уровнях, а также по вопросам установления границ территориальных единиц различного уровня. Выявлено, что в ряде стран СНГ (Российская Федерация, Украина) также имеются проблемы с актуализацией кадастровых сведений, в том числе и о границах АТЕ.

Рассмотрим *нормативную базу и порядок установления границ на примере Российской Федерации*. Территория Российской Федерации состоит из территории её субъектов и согласно статье 65 [4] включает: республики, края, области, города федерального значения, автономные области, автономные округа. Структурная составляющая административно-территориального устройства субъекта, в качестве которой чаще всего называется административно-территориальная единица, выделяется в целях реализации властных полномочий органами государственной власти субъекта федерации [5].

Земельные споры, возникающие между смежными регионами, могут причинять неудобства местным органам управления, а также гражданам, проживающим на пограничных территориях. Тем не менее в России до сих пор нет отлаженного механизма урегулирования таких споров.

Пилотным регионом, в котором будет опробован новый механизм урегулирования пограничных споров между регионами, станет Сибирский федеральный округ. Прежде всего, там предстоит внести в Единый государственный реестр все границы субъектов. Федеральной службой государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр) представлен план картографических работ на данную территорию. Положительный опыт Сибири даст основу для внесения изменений в законодательство, которые коснутся закона о кадастре, закона об описании границ объектов землеустройства, закона о регистрации объектов недвижимости, закона о местном самоуправлении, а также издание отдельного закона о границах субъектов федерации [6].

Согласно [6] установление границ субъектов предлагается проводить в определённой последовательности: первоначально установить границы населённых пунктов, опираясь на современные документы территориального планирования, к которым относятся генпланы населённых пунктов, а не на основе земельных карт; затем необходимо установить границы муниципальных образований.

Рассмотрим подробнее существующий порядок установления границ административно-территориальных образований (далее – АТО) Российской Федерации. Создание новых или объединение, преобразование, упразднение существующих АТО, изменение их границ и наименований входит в состав полномочий органов государственной власти субъектов федерации и Российской Федерации в целом.

Однако можно выделить ряд нормативно-правовых актов, регулирующих установление границ в общем по Российской Федерации:

1) Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.11.2015 г. № 2444-р «Об утверждении комплексного плана мероприятий по внесению в государственный кадастр недвижимости сведений о границах между субъектами Российской Федерации, границах муниципальных образований и границах населённых пунктов в виде координатного описания»;

2) Приказ Минэкономразвития Российской Федерации от 23.11.2018 № 650 «Об установлении формы графического описания местоположения границ населённых пунктов, территориальных зон, особо охраняемых природных территорий, зон с особыми условиями использования территории, формы текстового описания местоположения границы»;

3) Приказ Росреестра от 01.08.2014 года № П/369 «О реализации информационного взаимодействия при ведении государственного кадастра недвижимости в электронном виде».

Установление (восстановление) и упорядочение границ административных районов и границ субъектов Российской Федерации проводится в случаях:

- образования новых административно-территориальных единиц;
- объединения, упразднения, преобразования и разграничения существующих административно-территориальных образований при отсутствии между ними закреплённых на местности известных границ;
- изменения или уточнения их по инициативе соответствующих административно-территориальных образований.

Порядок и последовательность проведения работ определяется законом субъекта федерации.

Заказчиком работ по установлению (восстановлению) границ АТО является орган исполнительной власти субъектов Российской Федерации или органы местного самоуправления соответствующего уровня. Установление (восстановление) на местности границ АТО производится на основе соответствующих проектов, в которых должно быть дано описание границ. В случаях если по тексту описания границы не представляется возможным четко определить ее прохождение в натуре, на местности устанавливаются межевые знаки.

Согласно [7] при установлении на местности границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципальных образований, населённых пунктов узловые точки таких границ (характерные точки, являющиеся общими для границ трех и более субъектов Российской Федерации, муниципальных образований или населённых пунктов), а также ближайшие к ним характерные точки границ закрепляются долговременными межевыми знаками и используются в качестве пунктов опорной межевой сети.

К устанавливаемым границам предъявляются традиционные для землеустройства требования: ясность, четкость, устойчивость и удобство опознания на местности; учет линейных элементов природного комплекса (геоморфологии, гидрографии, почвенного и растительного покрова) и инфраструктурно-

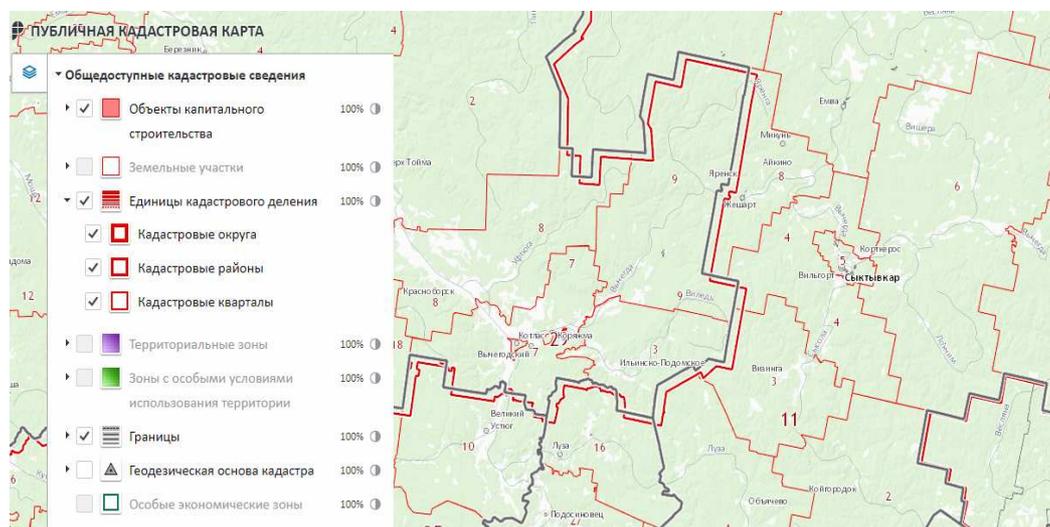
го обустройства территории, сложившегося хозяйственного использования, так как от того, каким образом будут размещены границы административного района, зависят конфигурация землевладений и землепользований, условия организации и управления производством. Точность определения координат устанавливаемых межевых знаков должна обеспечивать необходимую точность определения координат характерных точек границ земельных участков на прилегающей к границе объекта землеустройства территории.

Установление на местности границ административно-территориального района предшествует разработке схемы землеустройства этого образования. Границы района вместе с составом его территории фиксируются в уставе административного района. Спорные участки, выявленные в ходе выполнения работ по согласованию границ между субъектами Российской Федерации, разделяются на три группы: 1) земельные участки, одновременно учитываемые в двух субъектах Российской Федерации; 2) земельные участки, которые не учитываются ни в одном из субъектов Российской Федерации; 3) участки границ, имеющие неточности в картографическом отображении границы. Землеустроительный процесс в данном случае предусматривает: проведение подготовительных работ; составление проекта; его рассмотрение и утверждение; перенесение в натуру; оформление землеустроительных документов.

Степень сложности и трудоемкости работ зависит от затрагиваемой площади, количества землевладений и землепользований, топографических условий местности.

Установленные границы заносятся в Единый государственный реестр недвижимости (ЕГРН) в соответствии с требованиями земельного и градостроительного законодательства Российской Федерации, после чего данные об их местоположении приобретают доступный характер и отображаются на публичной кадастровой карте, размещенной на официальном сайте Росреестра.

Рассматривая систему кадастрового учёта земель, необходимо отметить возникающие проблемы при несоответствии границ административно-территориальных единиц и единиц кадастрового деления (рисунок). Единицами кадастрового деления территории Российской Федерации являются кадастровые округа, кадастровые районы и кадастровые кварталы. Изменение описания местоположения границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципальных образований и населенных пунктов, а также прекращение их существования, образование новых или изменение не влечет изменения кадастрового деления в принципе [8]. Однако существуют случаи необходимости нормализации кадастрового деления в связи с изменением границ административно-территориальных единиц, что выражается в изменении границы на планово-картографических материалах.



Соотнесение границ административно-территориальных единиц и единиц кадастрового деления на Публичной кадастровой карте Росреестра [9]

С точки зрения нормативно-правового, технического обеспечения землеустроительных работ по установлению границ АТЕ, ситуация в Украине также неоднозначна. Этот вопрос является первоочередным для страны, так как в Украине до сих пор действует Закон об административно-территориальном устройстве, который был принят еще в 1981 году Указом Президиума Верховного Совета Украинской ССР.

В 2018 году одобрен законопроект «Об основах административно-территориального устройства Украины», который, как считается, должен детально урегулировать отношения по установлению и изменению границ административно-территориальных единиц. Законодательно документ регулирует вопрос

о порядке образования, ликвидации, установления и изменения границ административно-территориальных единиц, названий населенных пунктов и отнесения их к определенным категориям. Также вводится государственная регистрация административно-территориальных единиц и создание электронного банка данных – Государственного реестра административно-территориальных единиц Украины [10].

Однако даже при отсутствии такого специального закона в настоящее время, действующие законодательные акты в целом определяют порядок установления и изменения границ административно-территориальных образований.

В Земельном кодексе Украины [11] под границей района, села, поселка, города, района в городе понимается условная замкнутая линия на поверхности земли, отделяющая территорию района, села, поселка, города, района в городе от других территорий.

Общим в установлении границ любой административно-территориальной единицы является определение границ по проектам землеустройства. После разработки проекта землеустройства он подлежит государственной землеустроительной экспертизе (ст. 9 Закона Украины «О государственной экспертизе землеустроительной документации») и утверждению компетентным органом в соответствии с полномочиями, определенными статьей 174 Земельного кодекса [11].

В настоящее время технология работ по установлению и изменению границ административно-территориальных единиц регламентируются в статье 46 Закона Украины «О землеустройстве» [12].

Для установления или изменения границ административно-территориальных образований разрабатываются проекты землеустройства по установлению (изменению) границ соответствующих административно-территориальных образований. Проект землеустройства по установлению (изменению) границ административно-территориальных единиц включает:

- а) пояснительную записку;
- б) задание на выполнение работ;
- в) решение о разработке проекта землеустройства по установлению или изменению границ административно-территориальных единиц;
- г) заверенные в установленном порядке копии генерального плана населенного пункта, решений о его утверждении (в случае изменения границ населенного пункта);
- д) выкопировки со схемы землеустройства и технико-экономического обоснования использования и охраны земель административно-территориальной единицы, а в случае ее отсутствия – выкопировки из проекта формирования территорий сельских, поселковых советов;
- е) выкопировки с кадастровых карт (планов) с отображением существующих (при их наличии) и проектных границ административно-территориальной единицы;
- ж) экспликацию земель в существующих (при их наличии) и проектных пределах административно-территориальной единицы;
- з) описание границ административно-территориальных единиц;
- и) материалы согласования проекта;
- к) материалы выноса границ административно-территориальных единиц в натуру (на местность) с каталогом координат их поворотных точек.

Законом [13] внесены изменения в порядок согласования и утверждения вышеуказанных проектов, а также отменена статья 176 Земельного кодекса [11], в которой указывалось наличие процедуры удостоверения границ административно-территориальных единиц государственным актом Украины.

Заключение. Рассматривая вопросы правового регулирования, геодезического, картографического, геоинформационного обеспечения, можно сделать вывод о том, что во многих странах они недостаточно урегулированы, что создаёт определённые трудности для кадастрового учёта границ АТЕ и системы землеустройства в целом.

На основании проведенного исследования, можно выделить основные положения, которые могут быть полезны при развитии системы учета изменения границ административно-территориальных единиц в Республике Беларусь:

- в Российской Федерации граница АТЕ зачастую фиксируется в натуре, т.е. на местности закреплена межевыми, информационными знаками, в отличие от Республики Беларусь, где согласно [1] в работах по нормализации и установлению границ, она привязывается к твердым контурам местности, затем происходит её описание и координирование. Координаты нормализованной границы района (области) определяются средствами ЗИС, в ее системе координат и записываются с точностью до 1 м;

- описание местоположения границ АТЕ составляется с использованием сведений Единого государственного реестра недвижимости, Единой электронной картографической основы, картографического материала, материалов дистанционного зондирования, а также по данным измерений, полученных на местности;

- с целью формирования электронных документов в процессе информационного взаимодействия при ведении государственного кадастра недвижимости используются XML-схемы для передачи в государственный кадастр недвижимости сведений об установлении (изменении) границ между субъектами Российской Федерации, границ муниципального образования, границ населенного пункта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по нормализации и установлению границ административно-территориальных единиц Республики Беларусь : утв. приказом респ. унитарного предприятия «Проектный ин-т Белгипрозем» от 11.04.2016 № 20. – Минск : Проектный ин-т Белгипрозем, 2016. – 31 с.
2. Об административно-территориальном устройстве Республики Беларусь : Закон Респ. Беларусь, 5 мая 1998 г. № 154-З (в ред. от 7.01.2012 г. № 346-З) // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2001. – 2/686.
3. Кодекс Республики Беларусь о земле : 23 июля 2008 г. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2008. – 2/1522.
4. Конституция Российской Федерации : офиц. изд. – М. : Юрид. лит., 2009. – 64 с.
5. Лексин, И.В. Административно-территориальное устройство и система муниципальных образований: региональные особенности и реформы местного самоуправления / И.В. Лексин // Местное право. – 2001. – № 8. – С. 29–49.
6. В России может появиться закон о региональных границах (тематическая статья) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pnp.ru/social/v-rossii-mozhet-poyavitsya-zakon-o-regionalnykh-granicakh.html>.
7. Об утверждении Правил установления на местности границ объектов землеустройства : постановление Правительства Российской Федерации, 20.08.2009 г., № 688 (ред. от 17.05.2016).
8. Об утверждении порядка кадастрового деления территории Российской Федерации, порядка присвоения объектам недвижимости кадастровых номеров, номеров регистрации, реестровых номеров границ : приказ М-ва экономического развития Российской Федерации, 24 нояб. 2015 г., № 877 (ред. от 16.11.2018 г.).
9. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pkk5.rosreestr.ru>. – Дата доступа: 18.06.2019.
10. Одобрен законопроект об административно-территориальном устройстве Украины (тематическая статья) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bykvu.com/bukvy/85774-kmu-odobril-zakonoproekt-ob-administrativno-territorialnom-ustrojstve-ukrainy>. – Дата доступа: 18.06.2019.
11. Земельный кодекс Украины: Официальный текст с изм. и доп. Вступил в силу с 1 янв. 2002 г. от 25.10.2001, № 2768-III.
12. О землеустройстве : Закон Украины от 22.05.2003, № 858-IV.
13. О внесении изменений в некоторые законодательные акты Украины относительно определения состава, содержания и порядка согласования документации по землеустройству : Закон Украины от 02.06.2015 № 497-VIII.

Поступила 20.06.2019

FEATURES OF FOREIGN EXPERIENCE OF ESTABLISHING BOUNDARIES OF ADMINISTRATIVE-TERRITORIAL UNITS

M. MAKAROVA

Article contains the definition and description of challenges of land survey works to normalize and establish the boundaries of administrative-territorial units of the Republic of Belarus. Includes the result of the analysis of the existing cadastral registration of land, including the registry of administrative and territorial units operating in neighboring countries (Russia and Ukraine). Considered in detail the scope of work to establish the boundaries of administrative and territorial units of the Russian Federation. Reflects the existing problems of legal regulation, information and geodetic support of the establishment of boundaries, as well as their solutions. Based on the material presented, certain conclusions were drawn regarding the applicability of these methods in the conditions of the Republic of Belarus.

Keywords: *administrative-territorial units, the establishment of boundaries, the normalization of boundaries, land management, land cadastre.*

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА

<i>Захаркина Г.И.</i> Усадьба Гребницких и прилегающая к ней территория в агрогородке Ореховно Ушачского района: современное состояние	2
<i>Платонова Р.М., Лукьяненко В.Г., Зеленков А.Т.</i> Архитектурно-конструктивное решение усадебного дома А.А. Римского-Корсакова в деревне Бездедовичи Полоцкого района	10

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Никитин В.И., Кофанов В.А., Бацкель-Бжозовска Б.</i> Определение теплопроводности влажных газонаполненных полимерных материалов	15
<i>Катульская А.С., Парфенова Л.М.</i> Комплексная минеральная добавка на основе промышленных отходов для гипсового вяжущего	24
<i>Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Боровкова Е.С., Трамбицкий Е.А.</i> Мониторинг структурного состояния цементных систем по параметрам сигналов акустической эмиссии и тензометрии	30
<i>Разуева Е.А., Парфенова Л.М.</i> Кинетика твердения золошлакощелочного вяжущего	35
<i>Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Боровкова Е.С., Трамбицкий Е.А.</i> Способ акустическо-эмиссионного исследования внутреннего состояния цементного камня при его хлоридной коррозии	41

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Сернов В.А., Тронда Т.В.</i> Модельные исследования и практическое применение вертикальных армодрирующих элементов для улучшения слабых глинистых грунтов в городе Минске	45
<i>Нияковский А.М., Романюк В.Н.</i> Оценка энергетической эффективности режимов тепловой обработки композитных бетонных изделий сложной 3D-геометрии в теплотехнологических установках	53
<i>Гиль А.И., Лазовский Е.Д.</i> Методика экспериментальных исследований неразрезных железобетонных балок с гибридным армированием растянутой зоны центрального опорного сечения	59

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Ющенко В.Д., Лесович Е.В.</i> Оценка методик, применяемых для определения потерь воды при аварии в водопроводных сетях населенных пунктов	65
<i>Нияковский А.М., Романюк В.Н.</i> Разработка научно-методических основ эксергетического анализа процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках	70
<i>Головнев И.Э.</i> Возможность использования ультразвуковой обработки сырого осадка первичных отстойников городской системы канализации	79
<i>Василевич Н.А., Василевич Д.А., Пивоварова С.И.</i> Особенности проектирования гелиосистемы для механической системы приточной вентиляции культового здания для улучшения его микроклимата	84

ГЕОДЕЗИЯ. ФОТОГРАММЕТРИЯ И ЗЕМЕЛЬНЫЙ КАДАСТР

<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В.</i> Проверка возможности создания плана фасада здания при направлении осей координат фотограмметрической системы координат параллельно осям координат условной системы координат	90
<i>Крячок С.Д., Мамонтова Л.С., Щербак Ю.В.</i> Обоснование точности определения площадей земельных участков полюсным методом	99
<i>Мыслыва Т.Н., Куцаева О.А.</i> Геостатистический анализ как инструмент оценки пространственного распределения свойств почв земель сельскохозяйственного назначения	105
<i>Макарова М.В.</i> Особенности зарубежного опыта установления границ административно-территориальных единиц	113