

MIESIĘCZNIK  
POŁOCKI.

Т о м I.  
Р о к 1818.

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



---

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА  
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

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

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия F. Строительство. Прикладные науки

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

---

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

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

---

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

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

Подписано к печати 30.12.2015. Бумага офсетная 65 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ризография.  
Усл. печ. л. 21,62. Уч.-изд. л. 26,06. Тираж 100 экз. Заказ 1785.

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.03(476.5)

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СИЛУЭТА ГОРОДА ПОЛОЦКА В ПЕРИОД С КОНЦА XVII ДО КОНЦА XIX ВЕКА

**Я.Д. ФИЛИППЕНКО**

*(Полоцкий государственный университет)*

*Приведены результаты исследования иконографических и литературных источников с выявлением особенностей развития силуэта города Полоцка, прослежены основные этапы его трансформации в период с конца XVII до конца XIX века. Особое внимание уделено анализу преемственности композиционного построения системы высотных доминант в исторической части города, в том числе ее пространственному отображению в планировке. В ходе изучения выявлены три этапа интенсивного развития силуэта города и стилистические особенности его архитектурно-художественного образа. Архитектурно-композиционная выразительность, оригинальность, узнаваемость и в то же время целостность построения силуэта древнего Полоцка позволяют отметить его значимость и ценность как с точки зрения истории архитектуры, так и туризма.*

**Введение.** Все города имеют неповторимый, узнаваемый внешний вид, возникая и развиваясь в уникальных природных условиях и в разные исторические эпохи. Их архитектурный облик отражает эстетико-культурные и экономические взгляды общества, находящегося на определенной ступени развития. Каждый город обладает оригинальной планировочной структурой, даже если он построен по определенным стандартам и законам какого-либо стиля, однако доступно понимание сложности и красоты этой структуры только профессионалам, непосредственно работающим с планировкой. Но оценить гармоничность, неповторимость и выразительность вертикальной композиции города, его силуэт может каждый. Весьма важный аспект поддержания облика исторического города – сохранение силуэтности застройки. Зодчие и градостроители всегда обращали внимание на силуэт города, улицы и сочетаемость различных архитектурных объектов [1, с. 192]. Силуэт имеет для нас немаловажное значение в силу фундаментальных особенностей человеческой психики. Горизонталь и вертикаль равнозначны только в абстрактной системе декартовых координат. Направления по горизонтали образуют собой привычный мир наших обыденных действий, а вертикаль ассоциируется с некоторым душевным усилием, с проявлением человеческой воли, даже является «вызовом небу» [2, с. 43].

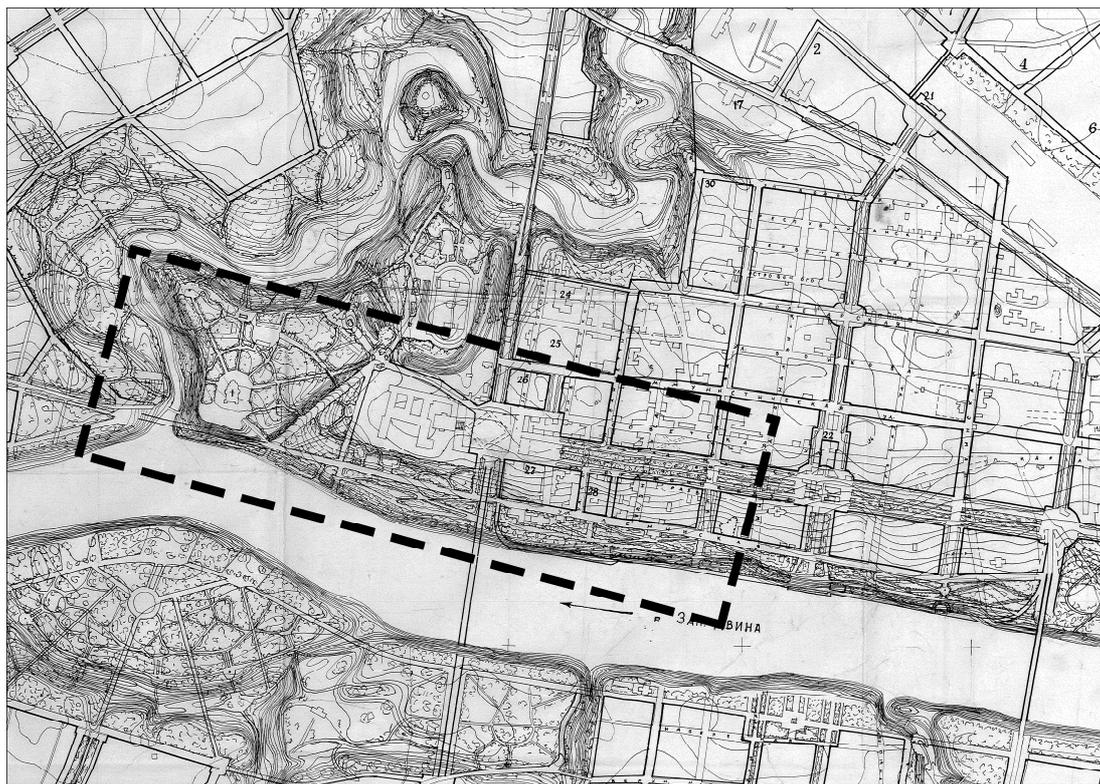
**Основная часть.** «Накопленный опыт изучения силуэта исторически сложившихся городов как пространственной системы высотных доминант показывает, что в ней необходимо обнаружить такие постоянно присущие композиционные качества, как единство, сложность и завершенность, но не только на последней, высокой стадии развития, а на всех предыдущих этапах. Лишь при этом можно выявить закономерности ее преобразования, позволяющие сохранить ее композиционную целостность в условиях территориального роста города, возникновения новых и отмирания некоторых прежних ориентиров и взаимосвязей. Только так можно определить и степень преемственности в формировании городской структуры» [2, с. 144].

Хронологические рамки в данном исследовании определены периодом с конца XVII до конца XIX века. В первую очередь это обусловлено наличием достаточного количества иконографических и литературных источников по означенному периоду. Для построения панорамных разверток более раннего этапа развития силуэта города Полоцка не сохранилось достаточного количества фактических материалов, а любая попытка их построения будет носить в большой степени субъективный и гипотетический характер.

Построение же разверток XX века требует отдельного и глубокого исследования, анализа широкого спектра источников. Географические рамки рассматриваемой территории отображены на рисунке 1 и включают Верхний замок, большую часть Великого посада и небольшой участок Заполотского посада. В данном случае выбор продольных границ обусловлен большой концентрацией на этом участке силуэтообразующих элементов, а поперечных – возможностью одномоментного визуального восприятия с учетом закономерностей перспективного сокращения. Важную роль в построении силуэта города играет учет оптических условий видимости. По мере удаления от рассматриваемого объекта постепенно теряются детали, ступеневывается цвет.

Для адекватного понимания представленной информации вначале определимся с терминологией. В этом вопросе среди архитекторов нет единства. Зачастую одни и те же понятия употребляются в абсолютно разных значениях и для различных явлений. «Вертикальная композиция города – это объективно

существующая и пространственно развивающаяся система, которая складывается из элементов природного ландшафта, вертикальных акцентов (доминант) с их взаимными связями (функциональными, пространственными, композиционными) и фоновой застройки» [3, с. 24]. Для графического же выражения высотной композиции города существует несколько типов изображений: панорама, фасад, силуэт, очертание. Чудинова Т.С. предлагает следующую иерархию значений: «Панорама – перспективное изображение; точка зрения должна находиться не выше горизонта воспринимаемой застройки, иначе начинает преобладать планировочная проекция... Фасад города – ортогональная проекция застройки при удалении точки наблюдения на бесконечное расстояние; изображение при этом может быть одно- или многоплановым... Силуэт города – это абрис ортогональной или перспективной проекции застройки, плоскостное однотонное или линейное изображение» [3, с. 26].



**Рисунок 1 – Географические рамки исследуемой территории**

«Силуэт города – это его пространственное очертание, воспринимаемое издали своими контурами или массой, в ряде случаев – его высотная композиция, определяемая соотношением между отдельными вертикальными акцентами или их группой и основным массивом застройки» [4, с. 9].

Мы будем рассматривать силуэт, скорее, как панорамную развертку (фасад) прибрежной территории исторической части города. Силуэт города также является одним из основных средств архитектурно-художественной целостности застройки, он выявляет индивидуальность города. Силуэтообразующие архитектурные объекты – высотные доминанты, обладающие не только вертикальной направленностью и значительной высотой, но и композиционной и художественной выразительностью, несущие определенную символическую и смысловую нагрузку.

На основе проанализированных источников построены три изображения силуэта города Полоцка в конце XVII, XVIII, XIX веков. Для построения первого изображения использовались в первую очередь рисунок С. Пахоловицкого «Осада Полоцка королем Стефаном Батория в 1579 г.» и план Полоцка 1707 г. (РГВИА\*, фонд 846, оп. 16, д. 22367), на котором представлены основные объекты. Данные источники позволяют судить не только о местонахождении памятников, но и о их внешнем виде, хотя и приблизительно. Для уточнения места расположения тех или иных архитектурных объектов использовались и более поздние планы города.

Таким образом, силуэтообразующими объектами в конце XVII века можно назвать (рис. 2): церковь Святых Козьмы и Демьяна в Заполотском посаде (1); Софийский собор (2); деревянный иезуитский кос-

\* РГВИА – Российский государственный военно-исторический архив.

тел (3); деревянный иезуитский монастырь с костелом (4); монастырь бернардинцев (5); монастырь францисканцев (6); Богоявленский монастырь (7).

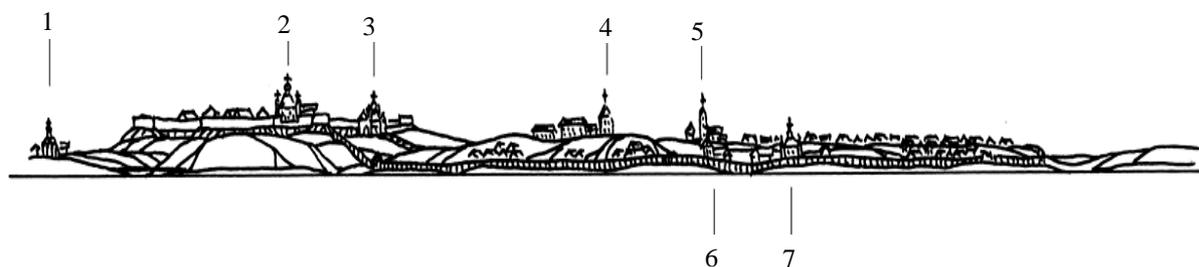


Рисунок 2 – Силуэт города Полоцка в конце XVII века

Софийский собор имел главенствующее значение не только как первый каменный памятник архитектуры и древнейшая белорусская святыня, но и как доминанта в силуэте города, что видно из рисунка 2. Этот эффект усиливается и его размещением на верхней площадке рельефа в так называемом Верхнем замке, окруженном крепостной стеной и другими оборонительными сооружениями.

Что касается пространственного построения композиции высотных доминант, то здесь следует отметить наличие узлов, соответствующих вышеозначенным объектам, и связей, отражающих визуальные оси между ними (рис. 3). Если же идеализировать данную схему, можно выявить две основные продольные оси, одна из которых связывает узлы 1, 2 и 4, а вторая – узлы 6 и 7, расположенные на нижней пойменной террасе. Значима также и поперечная ось, перпендикулярная продольным осям, связывающая узлы 5 и 6. Радиальная же ось 2–3 имеет, скорее, второстепенное значение.

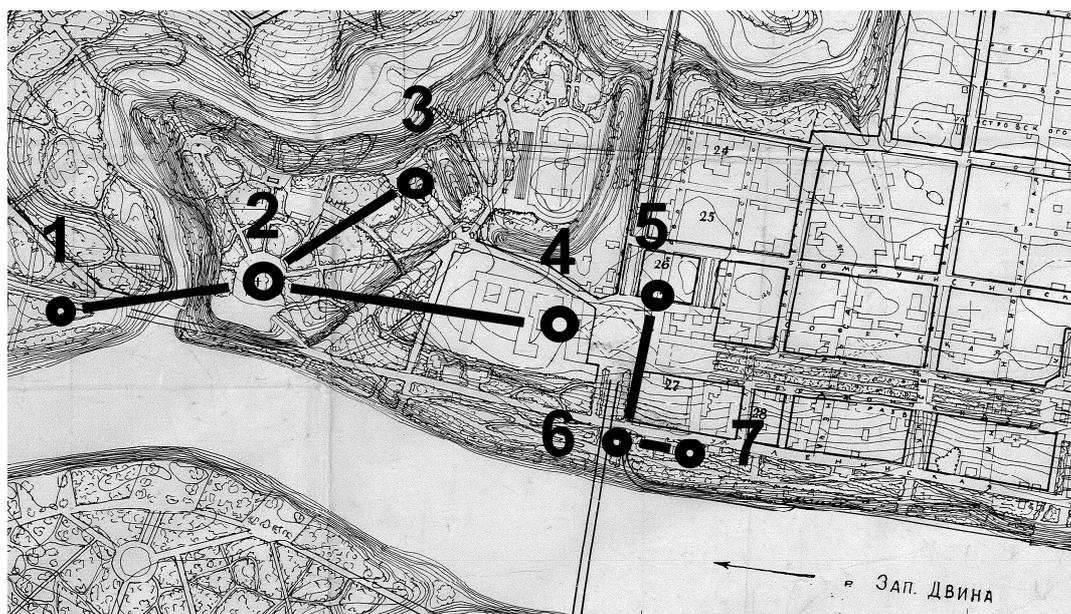


Рисунок 3 – Пространственное построение композиции силуэтообразующих объектов, конец XVII века

Для построения изображения силуэта города в конце XVIII века были изучены: фиксационный план 1778 года (по А.П. Сапунову); фиксационный план конца XVIII века, составленный до регулярной перепланировки города; проект перепланировки Полоцка 1793 года архитектора И. Зигфридена; рисунки конца XVIII века; рисунок Х.В. Фабера дю Форэ 25 июля 1812 года. Большинство из силуэтообразующих архитектурных объектов XVII века были деревянными, в результате пожаров все они были уничтожены. Даже Святая София не избежала подобной участи, будучи взорванной отступающими царскими войсками в 1710 году. В первой половине XVIII века (к 1745 году) на месте деревянного сооружения каменный иезуитский костел Святого Стефана. А в 1750 году на месте уничтоженного пожаром деревянного коллегиума началось строительство нового каменного грандиозного комплекса, который вместе с костелом создавали величественный архитектурный ансамбль. В системе высотных сооружений города иезуитский костел стал главным. В 1738–1750 годах униатами был восстановлен храм Святой Софии, получивший новый образ в стиле виленского барокко и ставший одной из основных

высотных доминант города. По проекту И. Зигфридена на северной и южной сторонах площади перед костелом Святого Стефана были построены одинаковые группы из трех зданий, а в 1783 году – дворец генерал-губернатора и каменные службы при нём. В 1774 году заложен каменный доминиканский костел Божьей Матери в 1781 – монастырский корпус, занявшие место сгоревшей деревянной обители. В 1761–1779 годах был построен каменный Богоявленский собор.

По рисункам и гравюрам конца XVIII века можно составить представление о внешнем виде большинства силуэтообразующих архитектурных объектов этого периода и построить соответствующую панорамную развертку (рис. 4): церковь Святых Козьмы и Демьяна в Заполотском посаде (1); Софийский собор (2); иезуитский коллегиум с костелом Святого Стефана (3); монастырь доминиканцев (4); Монастырь францисканцев (5); Богоявленский монастырь (6).

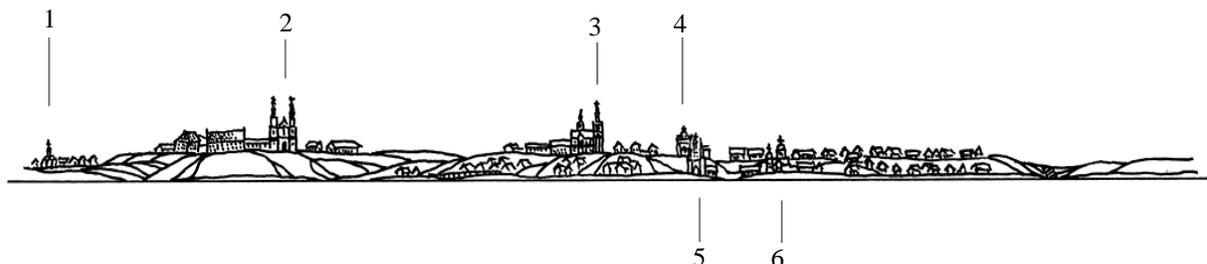


Рисунок 4 – Силуэт города Полоцка в конце XVIII века

Схема пространственного построения композиции силуэтообразующих объектов в конце XVIII века не претерпела значительных изменений, так как новые объекты возводились на месте ранее существующих. Преемственность пространственной композиции узлов и связей, безусловно, отразилась и на силуэте города, но стоит отметить, что значимость и выразительность вертикальной композиции сместилась от Верхнего замка к центральной площади.

Силуэт города Полоцка в конце XIX века (рис. 5) построен на основе планов города 1838 года, начала XIX века и 1910 года, а также сохранившихся фотографических снимков и открыток конца XIX и начала XX века. В середине XIX века город был значительно перестроен. Планировка центральной части города приобрела регулярный характер. Многие культовые и административные здания сменили барочный декор на классицистический. Некоторые памятники архитектуры безвозвратно утрачены.

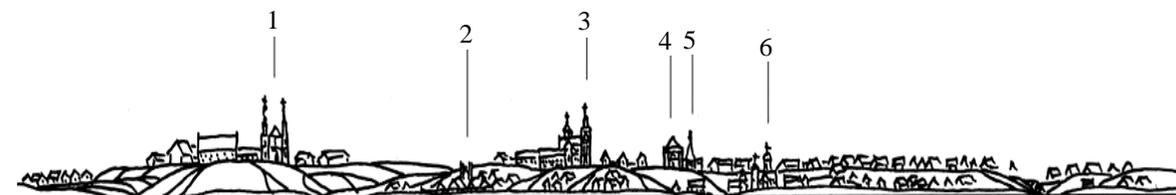


Рисунок 5 – Силуэт города Полоцка в конце XIX века

В 1812–1830 годах в зданиях коллегиума находилась иезуитская академия наук. В 1831–1833 годах комплекс реконструирован архитектором А. Порты для размещения кадетского корпуса. Костел был переименован в Николаевский собор, а площадь названа Корпусной.

Примером гармоничного подхода, дальнейшего преемственного формирования застройки послужил возведенный в 1850 году памятник героям Отечественной войны 1812 года (прежнее название «В память Отечественной войны 1812 года»). Монумент поставлен по тому же принципу, что и костел Святого Стефана, – на замыкании перспективы главной магистрали.

К концу XIX века уже был сформирован узнаваемый силуэт исторического центра Полоцка. Несмотря на увеличение этажности фоновой рядовой застройки, высотные доминанты не утратили своей выразительности. Вертикальная композиция города приобрела необходимые свойства единства и органичности. Схема пространственного построения композиции силуэтообразующих архитектурных объектов (рис. 6): Софийский собор (1); лютеранская кирха (2); Николаевский собор (3); монастырь доминиканцев (4); обелиск в память Отечественной войны 1812 года (5); Богоявленский монастырь (6) – в конце XIX века стала не только более насыщенной, но и более четкой. Так, можно выделить уже ранее обозначившиеся продольные оси 1–3–5 и 2–6, а также поперечную ось 5–6. Все эти оси имеют визуальное и пространственное продолжение. Развитие оси 1–3–5 в планировке соответствует улице Витебской, а ось 2–6 на нижней пойменной террасе визуально прослеживается до храма Покрова Пресвятой Богородицы, не вошедшей в исследуемый участок. Продолжением оси 5–4 являлась улица Рижская.

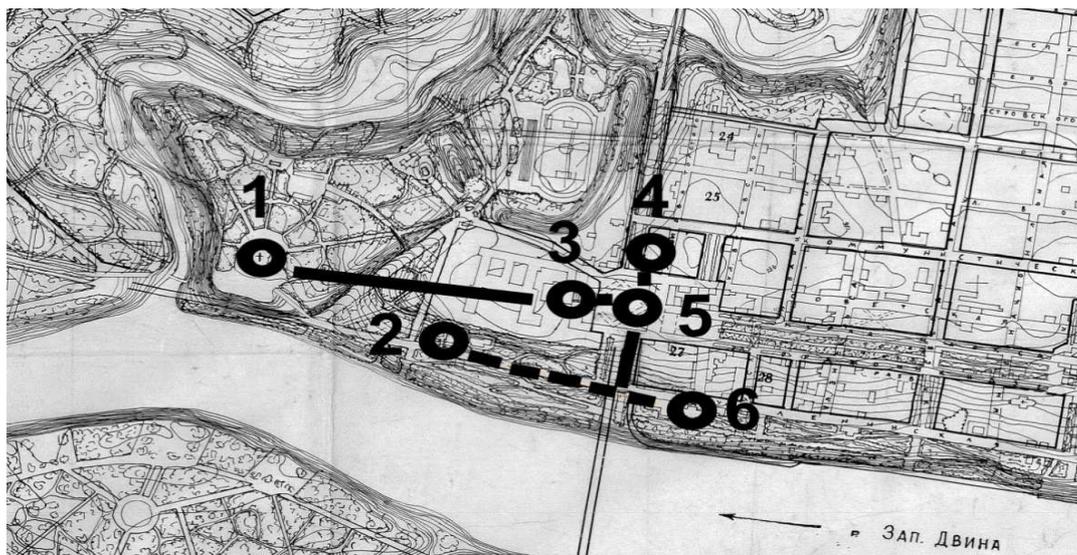


Рисунок 6 – Пространственное построение композиции силуэтообразующих объектов, конец XIX века

**Заключение.** Подытоживая проведенное исследование, отметим некоторые композиционные особенности, обуславливающие выразительность силуэта исторического центра города Полоцка. В первую очередь, отметим силуэтность и динамику естественного рельефа изучаемой территории, в который зодчими разных эпох органично вписывались наиболее значимые архитектурные памятники. Безусловно, интересный эффект создает линейность построения силуэтообразующих объектов на разных пойменных террасах, позволяя тем самым проследить плановость и разнообразность застройки. Композиционная и художественная выразительность самих объектов, а также их высокая концентрация на исследуемой территории являются необходимыми условиями для создания неповторимого и узнаваемого силуэта города. Одной из наиболее значимых особенностей можно назвать преемственность пространственного построения композиции силуэтообразующих объектов. Именно это постоянство в размещении наиболее значимых и выразительных архитектурных памятников позволило в сознании людей сформировать четкий, индивидуальный образ города Полоцка, его неповторимое лицо.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пруцын, О.И. Архитектурно-историческая среда / О.И. Пруцын, Б. Рымашевский, В. Борусевич; под ред. О.И. Пруцына; пер с пол. гл. 6–15 М.В. Предтеченского. – М.: Стройиздат, 1990. – 408 с.
2. Кишик, Ю.Н. Силуэт города: развитие системы высотных доминант / Ю.Н. Кишик. – Минск: Беларус. наука, 2014. – 327 с.
3. Чудинова, Т.С. Формирование вертикальной композиции исторических центров приречных городов Поволжья: дис. ... канд. архитектуры / Т.С. Чудинова. – М., 1985. – 197 с.
4. Баранов, Н.Н. Силуэт города / Н.Н. Баранов. – Л.: Стройиздат, 1980. – 184 с.

Поступила 04.12.2015

#### COMPOSITIONAL FEATURES OF THE EVOLUTION OF THE SILHOUETTE OF THE CITY OF POLOTSK IN THE LATE XVII – LATE XIX CENTURIES

Y. FILIPENKA

*This article presents some results of research and analysis of the iconographic and literary sources to identify the characteristics of the evolution of the silhouette of Polotsk, and also traced the main stages of its transformation during the period from the late seventeenth to the late nineteenth centuries. Special attention is paid to the analysis of the continuity of the composite system of high-rise dominants in the historic part of the city, including its spatial display in the layout. The research identified three stages of the intensive evolution of silhouette and style features of its architectural image. Architectural-compositional expressiveness, originality and integrity of the silhouette of ancient Polotsk make it meaningful and valuable for the history of architecture, and tourism.*

УДК 711.4(476)

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ БОЛЬШИХ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ  
И ИХ ОБЩЕГОРОДСКИХ ЦЕНТРОВ****В.И. МАТВЕЙЧУК***(Полоцкий государственный университет)*

*Анализируется планировочная организация больших городов Беларуси. Рассматривается связь общегородских центров городов с основными транспортными коммуникациями (главными улицами), рекреационными объектами (общегородскими парками, скверами, набережными и пр.), памятниками истории и архитектуры, а также с главными природными осями (реками) и узлами (озерами). Выявляются положительные и отрицательные характеристики планировки городов и их общегородских центров. Показано влияние природно-ландшафтных условий на формирование и развитие общегородских центров больших городов Беларуси.*

**Введение.** Большие города Беларуси играют важную роль в национальной системе расселения. Многие из них располагаются на транспортных коридорах страны (Полоцк, Новополоцк, Орша, Борисов, Барановичи, Мозырь, Пинск), являются транспортными узлами республики (Полоцк, Орша, Барановичи), имеют существенное экономическое значение как города с высоким уровнем развития промышленности (Новополоцк, Солигорск, Борисов). Кроме того эти города выступают носителями истории архитектуры и культуры Беларуси.

Большие города Беларуси (рис. 1): в **Витебской области** – **Новополоцк** (основан в 1958 г., население – 102,261 человек [1]); **Полоцк** (первое упоминание в 862 г., население – 85,126 человек [1]); **Орша** (первое упоминание в 1067 г., население – 116,583 человек [1]); в **Могилевской области** – **Бобруйск** (первое упоминание в 1387 г., население – 218,263 человек [1]); в **Гомельской области** – **Мозырь** (первое упоминание в 1155 г., население – 112,493 человек [1]); в **Брестской области** – **Пинск** (основан в 1097 г., население – 137,519 человек [1]), **Барановичи** (первое упоминание в 1627 г. (как деревня), основан – 1871 г., статус города получил в 1919 г., население – 178,889 человек [1]); в **Гродненской области** – **Лида** (первое упоминание в 1323 г., население – 99,976 человек [1]); в **Минской области** – **Борисов** (первое упоминание в 1102 г., население – 144,945 человек [1]), **Солигорск** (основан в 1958 г., население – 105,998 человек [1]), **Молодечно** (первое упоминание 16 декабря 1388 г., население – 94,686 человек [1]).



Рисунок 1 – Карта автомобильных дорог Республики Беларусь с нанесенными большими городами

### Основная часть

**Новополоцк** (основан в 1958 г., население – 102,261 человек [1]). Город имеет линейную сплошную структуру плана (рис. 2). Располагается вдоль реки Западная Двина, на левом берегу. Общегородской центр Новополоцка находится в отдельном квартале, образованном главной улицей Молодежной, а также улицами Кирова, Блохина и Юбилейная, в Западном жилом районе. Главная площадь города – площадь Строителей. К ней примыкает дендрариум и прибрежный парк со стадионом. Вдоль улицы Молодежной, у общественных зданий, сформировались отдельные планировочные узлы, в первых этажах жилых домов находятся учреждения общественного обслуживания.



Рисунок 2 – Панорама центральной части Новополоцка (а); фрагмент опорного плана Новополоцка (б) [2]

В связи с ростом города его общегородской центр значительно отделился от геометрического, так как Новополоцк – город с линейной структурой плана.

Масштабность застройки, активное включение в ансамбль прибрежного ландшафта Западной Двины, благоустройство и озеленение придали центру города индивидуальный выразительный облик. Этому способствуют и высокие градостроительные качества жилой застройки [3, с. 53].

**Полоцк** – самый древний город Беларуси (первое упоминание – 862 г., население – 85,126 человек), расположен по обеим сторонам реки Западной Двины, в устье реки Полота [1]. Полоцк имеет комбинированную планировочную структуру (рис. 3).

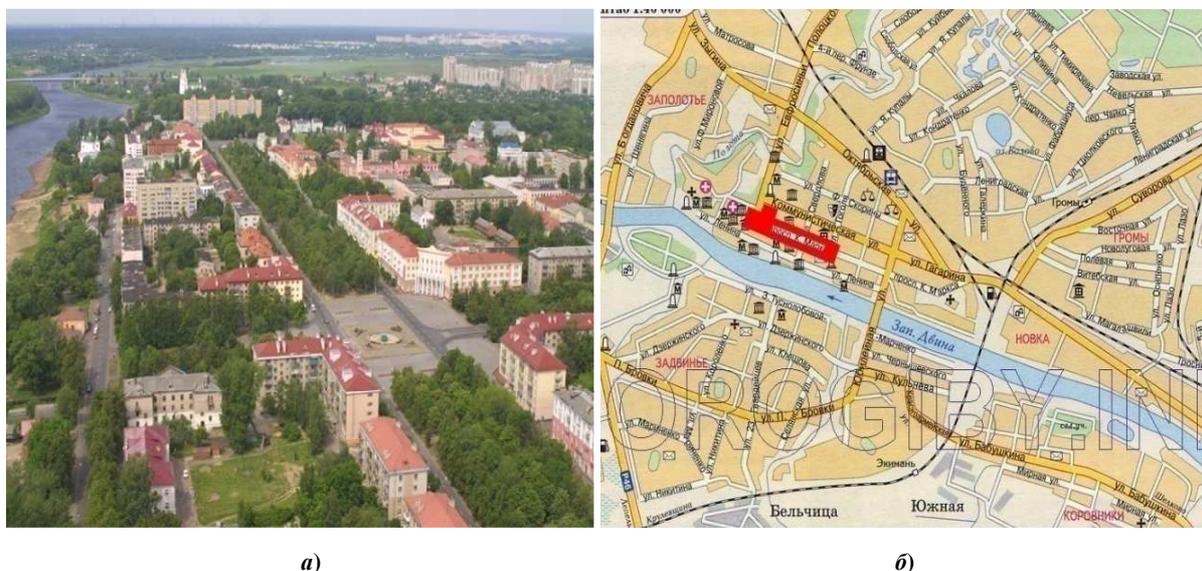


Рисунок 3 – Панорама центральной части Полоцка (а); фрагмент опорного плана Полоцка (б) [2]

Центр города Полоцка линейный, расположен вдоль проспекта К. Маркса, входит в состав территорий исторического центра и историко-культурного заповедника. В составе общегородского центра города две площади – главная площадь Свободы (входит в состав охранной зоны исторического центра города) и площадь Франциска Скорины.

Несмотря на насыщенность общегородского центра Полоцка объектами общественного назначения, памятниками истории и архитектуры, у города есть существенный недостаток – общегородской парк расположен на противоположном от центра берегу реки, что значительно снижает посещаемость главного парка города.

**Орша** (первое упоминание в 1067 г., население – 116,583 человек [1]). Город расположился по обе стороны Днепра, в устье реки Оршанка. Планировочная структура фокусированная (рис. 4). Существующий общественный центр Орши представляет собой систему, включающую улицы Ленина, Мира, главную площадь Ленина и площади у развилки улиц Мира, Островского и Комсомольской. Хотя некоторые достижения в формировании центра уже имеются (в частности, это касается планировочных узлов, новой застройки ул. Ленина), по степени развитости структуры, составу общественной застройки он не соответствует масштабу развития города, его роли в системе расселения [3, с. 51]. Центр пространственно раскрыт в сторону Днепра, вблизи которого он находится, но планировочной ярко выраженной связи не имеет (например, связь может осуществляться за счет аллеи, ведущей от общегородского центра к входу в парк или на набережную). Эта важнейшая ландшафтная ось участвует в композиции города.

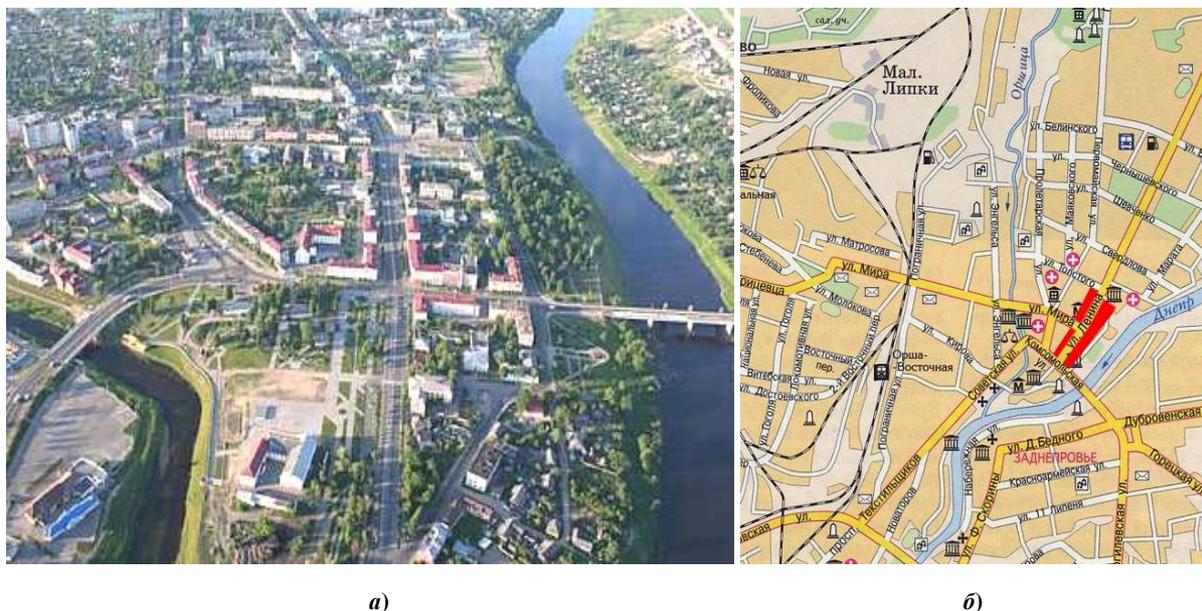


Рисунок 4 – Панорама центральной части Орши (а); фрагмент опорного плана Орши (б) [2]

Ранее через Оршу проходил один из транспортных коридоров республики, образуя транзит (международного значения) через город. Сегодня эта проблема отсутствует, так как около восточной части города была создана обходная магистраль. Ядро города пересекают транзитные потоки транспорта. Система транспортных коммуникаций в Орше частично преобразована в ходе подготовки к празднику урожая «Дожинки-2008». В композицию центра активно включается водно-зеленый диаметр города. Прибрежные территории расчищаются от застройки, не имеющей ценность с точки зрения истории и архитектуры, и преобразуются в парковую зону с вкраплениями общественных комплексов. Существующий центр также реконструируется и благоустраивается. В историческом ядре предусматривается пешеходная зона [3, с. 52–53].

**Бобруйск** (первое упоминание – 1387 г., население – 218,263 человек [1]). Город расположился на правом берегу Березины. Планировочная структура фокусированная (рис. 5). Существующее ядро общегородского центра Бобруйска находится между улицами Минской, Урицкого, Интернациональной и Октябрьской на большом удалении от главной природной оси (реки и примыкающих к ней парковых территорий). В нем рассредоточенно разместились общественные учреждения и предприятия обслуживания городского значения. Его магистрали входят в исторически сложившуюся радиально-лучевую структуру центра, заложенную в планах крепости в 1811 году. Главным элементом существующего центра является

улицы Горького с площадью Ленина и широкой эспланадой. Здесь сформировались наиболее выразительный ансамбль застройки и мемориальная пешеходная площадь Победы. В северном жилом районе, на продолжении перспективной застройки улицы Горького, был создан один из первых в республике совмещенных центров планировочного и административного районов. В его составе административное здание, Дворец культуры, гостиница, торговые учреждения. В первую очередь, требуются дальнейшая реконструкция улицы Горького, с пробивкой ее к центру планировочного района, а также организация выхода центра к реке Березине [3, с. 45–47].

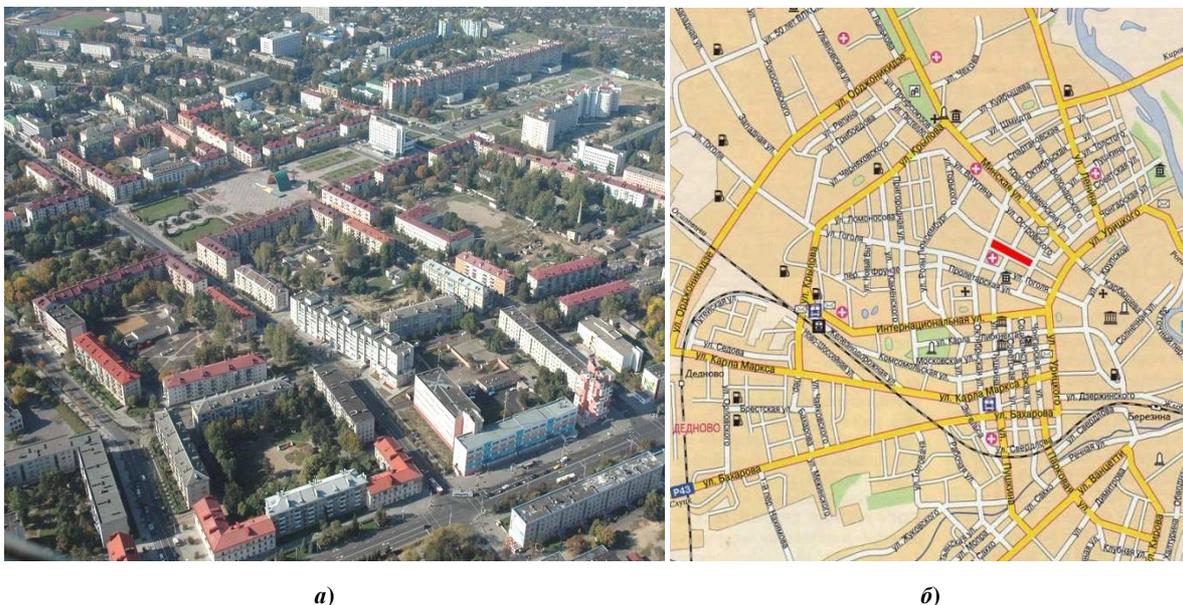


Рисунок 5 – Панорама центральной части Бобруйска (а); фрагмент опорного плана Бобруйска (б) [2]

Общегородской центр Бобруйска отрезан от реки и прибрежного парка Бобруйской крепостью (историческая крепость, внесенная в Государственный список историко-культурных ценностей Беларуси и отнесенная к ценностям республиканского значения).

**Мозырь** (первое упоминание – 1155 г., население – 112,493 человек [1]). Планировочная структура Мозыря комбинированная, с преобладанием регулярной (рис. 6).

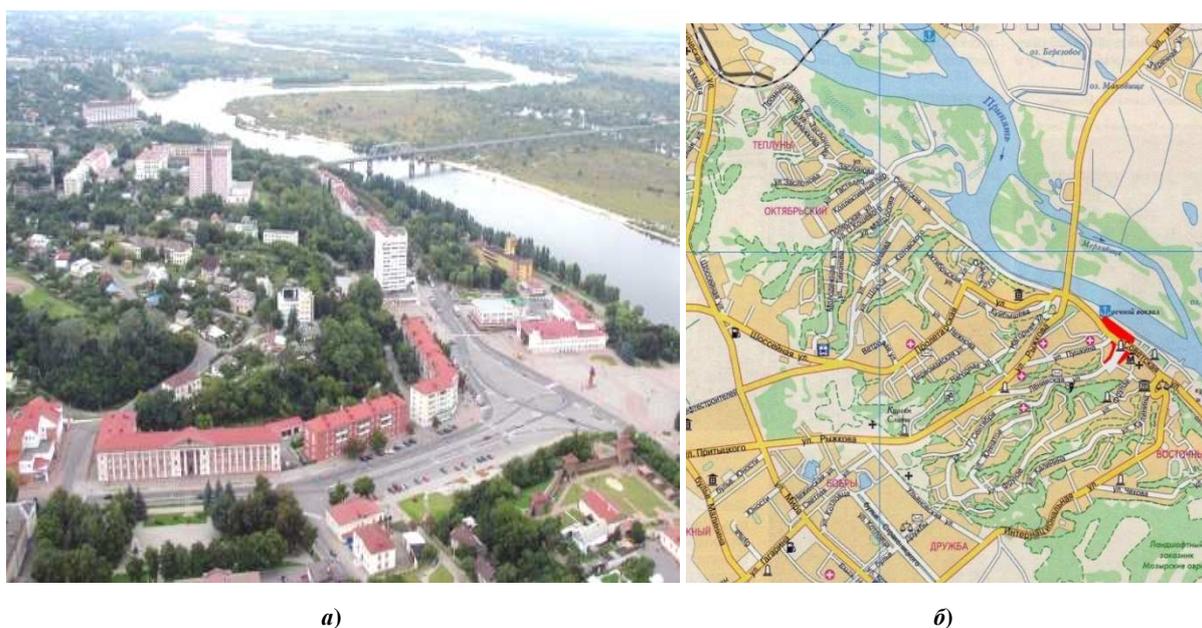


Рисунок 6 – Панорама центральной части Мозыря (а); фрагмент опорного плана Мозыря (б) [2]

Центр Мозыря к настоящему времени сложился в виде сети общественных объектов городского значения, расположенных вдоль улиц Ленинская и Советская, главной площади, набережной и прибрежной полосы, в сторону которой раскрыта эта площадь. В этом районе частично сохранилась историческая застройка. Здания общественного назначения сосредоточились в районах улиц Ленинской, Пушкина, Р. Люксембург. Однако целостных архитектурных ансамблей они не сформировали. Расчистка прибрежной полосы, размещение на ней ряда общественных учреждений, реконструкция застройки набережной существенно развили структуру, преобразили облик центра. Главная архитектурная доминанта площади – 12-ти этажный жилой дом с общественными объектами в уровне первого этажа. Также в центре присутствует и природно-ландшафтная доминанта – Замковая гора, на которой располагается Мозырский замок (деревянный). Несмотря на доминанты в центральной части города, отсутствует выразительный ансамбль главной площади. Таким образом, необходимо продолжать развивать городской центр в исторически сложившемся районе, при этом особое внимание должно быть уделено сохранению и активному использованию уникального рельефа полесской местности [3, с. 48].

**Пинск** (основан в 1097 г., население – 137,519 человек [1]). У города регулярная планировочная структура (рис. 7). Существующий центр Пинска – главная улица Ленина с площадью Ленина и новая набережная, между которыми расположена историческая зона. В послевоенные годы центр развивался в основном в западном направлении от исторической зоны. Сочетание новой и исторической застройки, выразительный силуэт последней, благоустройство и озеленение создают художественный облик центра. Его ядром выступает ряд планировочных узлов. Однако завершенных архитектурных ансамблей они не формируют. Территориальные резервы весьма ограничены, дальнейшая застройка связана с необходимостью определенной реконструкции.

Ядро общегородского центра в основном развивается в восточном и частично в западном направлении, вдоль реки Пины. Освоение пойменных территорий на противоположной стороне реки позволит организовать зону отдыха и спорта. Предусматривается веерообразная полицентрическая структура общегородского центра. Особое значение имеет регенерация исторического центра, где сохранились планировочная структура, ценные памятники архитектуры [3, с. 48–49] (одним из важнейших объектов главной площади города является бывший иезуитский коллегиум).



Рисунок 7 – Панорама центральной части Пинска (а); фрагмент опорного плана Пинска (б) [2]

**Барановичи** (первое упоминание – 1627 г. (как деревня), основан в 1871 г., статус города получил в 1919 г., население – 178,889 человек [1]). Город имеет регулярную систему планировки (рис. 8). Отрицательной чертой является отсутствие крупных природных осей и узлов в центральной части города. В Барановичах общественный центр сформировался в составе улицы Советской с площадью Ленина и влившейся в нее улицы Ленина; развитого планировочного узла, сформированного по улице Советской, где размещаются здание горисполкома и другие общественные учреждения; небольших площадей (курдонеров) у Дома культуры по улице Ленина и у торгового центра по улице Советской, расположенных вблизи главной площади [3, с. 44].

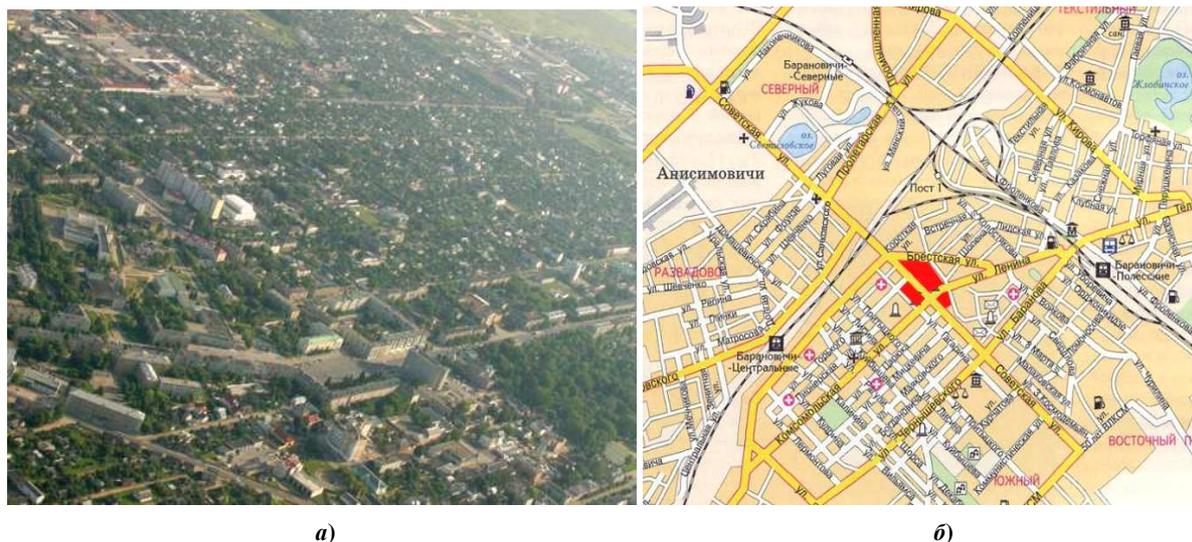


Рисунок 8 – Панорама центральной части Барановичей (а); фрагмент опорного плана Барановичей (б) [2]

**Лида** (первое упоминание – 1323 г., население – 99,976 человек [1]). Планировочная структура фокусированная (рис. 9). Послевоенный центр Лиды включал улицу Советскую, историческую зону Замоквой горы и площадь-курдонер перед зданием Дома офицеров. В последующем городской центр развивался за счет реконструкции улиц Победы и Ломоносова, параллельных улице Советской. Вдоль реки Лидейка расположен городской парк, а между ним и улицей Советской (на пересечении с Ленинской) располагается главная площадь города с важнейшими административно-общественными зданиями и Домом культуры. От площади Победы к вокзалу ведет пешеходная улица Чапаева [3, с. 49].

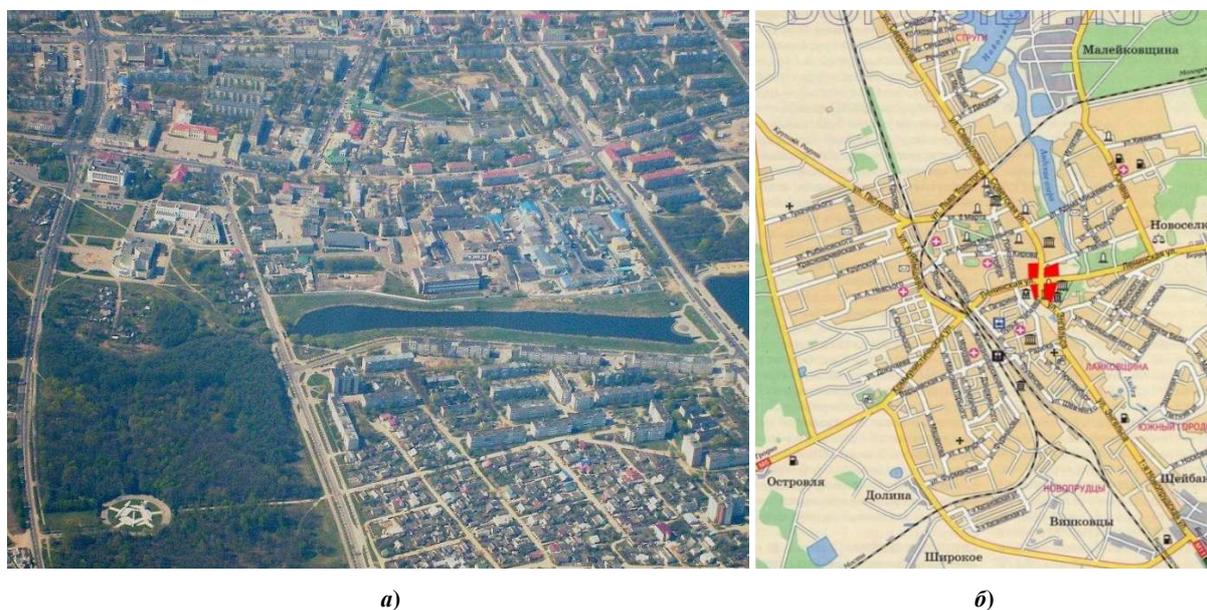


Рисунок 9 – Панорама центральной части Лиды (а); фрагмент опорного плана Лиды (б) [2]

На протяжении многих десятилетий серьезнейшей проблемой остается ограждение центра Лиды от транзитного движения вильнюсского направления. Относительно гродненско-минского направления, данная проблема решена за счет строительства обходной магистрали.

**Борисов** (первое упоминание – 1102 г., население – 144,945 человек [1]). Город имеет преимущественно регулярную планировочную структуру (рис. 10), расположившись по обе стороны реки Березины.

Общегородской центр Борисова организован на пересечении проспекта Революции и улицы Чапаева. Здесь (в месте их примыкания) создана главная площадь. У общественных зданий сформирован ряд планировочных узлов. Центр достаточно благоустроен и озеленен. Однако находясь недалеко от реки Березины, центр фактически отрезан от нее опорной застройкой, в частности предприятиями и общест-

венными объектами. Территориальные резервы в существующем центре исчерпаны, пешеходные зоны отсутствуют [3, с. 45]. Застройка общегородского центра однообразна (этажность и стилевое решение), единственное исключение – вкрапления исторической застройки на главной площади.



а)

б)

Рисунок 10 – Панорама центральной части Борисова (а); фрагмент опорного плана Борисова (б) [2]

Нельзя не отметить тот факт, что Борисов – один из крупных промышленных городов Минской области. В городе насчитывается 42 промышленных предприятия (заводы и фабрики), 16 совместных предприятий, 700 предприятий торговли и общественного питания всех форм собственности [4].

**Солигорск** (основан в 1958 г., население – 105,998 человек [1]). Планировочная структура города регулярная (рис. 11). Общегородской центр отличается единством композиционного решения. В его линейную структуру входят главная улица Ленина, главная площадь Ленина и эспланада, ведущая от площади к прибрежному парку с водохранилищем в одном направлении, и ось парка «Четырех стихий» – в другом. Все элементы этой композиции образовали целостный ансамбль, органически взаимосвязанный с примыкающими жилыми микрорайонами, городским бульваром и парком, который разбит у водохранилища и переходит в лесной массив [3, с. 53].



а)

б)

Рисунок 11 – Панорама центральной части Солигорска (а); фрагмент опорного плана города (б) [2]

**Молодечно** (первое упоминание – 16 декабря 1388 г., население – 94,686 человек [1]). Планировочная структура города фокусированная (рис. 12). Современный центр Молодечно сложился в послевоенный период на новой территории, где была сосредоточена и продолжает развиваться капитальная застройка. Исторический центр города приобрел значение подцентра.

В общественном ядре города – главная площадь Ленина, одна из лучших в республике. Застройка главной площади разнообразна как по высотности, так и по стилевым решениям. Она раскрыта в сторону сквера, переходящего в парк. От вокзала к этой площади проложена сформированная в 50–60-х годах прошлого столетия улица Пригыцкого с учреждениями культурно-бытового обслуживания [3, с. 47–48].



Рисунок 12 – Панорама центральной части Молодечно (а); фрагмент опорного плана города (б) [2]

Темпы развития архитектурно-планировочной структуры, транспортных систем общегородских центров больших городов значительно отстают от масштабов развития и роста самих городов. В генпланах этих городов намечился переход от моноцентрической структуры общегородских центров к полицентрической. В некоторых городах данный процесс связан с ростом численности населения, в других больших городах полицентрическая структура во многом определяется расчлененностью территории широкими реками (Орша, Борисов, Полоцк) и железной дорогой (Молодечно, Лида, Пинск, Полоцк, Барановичи, Орша, Бобруйск).

В разветвленных структурах общегородских центров предусматриваются дополнительные планировочные узлы, развитые открытые пространства, бульвары, скверы, отдельные пешеходные эспланады, набережные – Мозырь, Пинск (рис. 13).



Рисунок 13 – Фрагменты набережной Пинска

Общегородские центры больших городов Беларуси дополняются открытыми озелененными пространствами (Новополоцк, Орша, Бобруйск, Мозырь, Молодечно, Солигорск), пешеходными улицами или бульварами и площадями (Новополоцк, Полоцк, Бобруйск, Солигорск, Лида) и набережными (Мозырь, Пинск).

На протяжении многих десятилетий серьезной проблемой больших городов продолжает оставаться защита центров от интенсивного движения транспорта, организация бестранспортных пешеходных зон. Наиболее остро эта проблема стоит в Борисове, так как главная площадь города со всех сторон окружена магистралями (рис. 14), что буквально «отрезает» ее от пешеходов.



**Рисунок 14 – Главная площадь города Борисова**

В больших городах, особенно в Полоцке и Пинске, имеется застройка, представляющая собой историческую ценность, которая частично (Пинск) или полностью (Полоцк) входит в состав общегородского центра данных городов.

В Пинске около 35 памятников истории и архитектуры, а также мемориальных комплексов. Самый известный из них – иезуитский коллегиум (постройка 1631 г.). Сегодня в здании коллегиума разместились Музей Белорусского Полесья и детская хореографическая школа. Пинский костёл Святого Станислава, костёл Карла Барамея – памятник архитектуры конца XVIII века в стиле барокко – принадлежал монашескому ордену братьев-миссионеров Святого Карла Борromeо, в наше время это городской концертный зал. Бывший монастырь францисканцев с Собором Вознесения Девы Марии (рис. 15) – один из самых больших архитектурных ансамблей Беларуси стиля барокко. Дворец Бутримовича (постройка 1794 года в стиле барокко и классицизма с фрагментами канонической формы), в котором сегодня разместились городской отдел загса. Православный храм «Воскресения Славущего» и административное здание Пинско-Лунинецкой православной епархии. Пинск – второй после Гродно по числу сохранившихся памятников архитектуры в Республике Беларусь [5].



**Рисунок 15 – Бывший монастырь францисканцев с Собором Вознесения Девы Марии в Пинске**

В Полоцке располагается около 50 памятников истории и архитектуры, а также мемориальных комплексов, которые входят в состав Национального Полоцкого историко-культурного музея-заповедника. Самыми известными из них являются: Софийский собор (рис. 16) – один из самых ранних храмов Древней Руси наряду с Киевским и Новгородским Софийскими соборами (построен между 1044–1066 гг., разрушен в 1710 г., восстановлен в стиле виленского барокко в 1738–1750 гг.); комплекс зданий Спасо-Ефросиниевского монастыря (основан в 1128 г.), в том числе Спасо-Преображенский храм (1161 г., зодчий Иоанн), Евфросиниевская трапезная церковь (1847 г.) и Крестовоздвиженский собор (1893–1897 гг., архитектор В.Ф. Коршиков); комплекс зданий бывшего Богоявленского монастыря, в том числе Богоявленский собор (XVIII в.) и строение братской школы (1780–1788 гг.); комплекс зданий бывшего иезуитского коллегіума (сейчас один из корпусов Полоцкого государственного университета); комплекс зданий бывшего монастыря бернардинцев, в том числе римско-католическая церковь Девы Марии (1758 г.) – руины, жилой корпус (1758 г.) [6].



Рисунок 16 – Софийский собор в Полоцке

Стоит отметить, что памятники истории и архитектуры имеются практически в каждом большом городе Беларуси, за исключением двух самых молодых городов – Солигорска и Новополоцка. Некоторые результаты достигнуты в регенерации и реконструкции исторических центров и исторических комплексов в Пинске, Полоцке, Лиде.

Анализируя влияние природно-ландшафтных условий на формирование и развитие общегородских центров больших городов Беларуси, можно выделить следующие группы городов:

- 1) *города с исторически сложившимся общегородским центром вблизи устья рек:*
  - Полоцк – устье реки Полота;
  - Орша – устье реки Оршица;
  - Пинск – устье реки Пина;
- 2) *города, имеющие раскрытие общегородского центра на их главные природные оси (реки, парковые зоны) и узлы (озера):*
  - Новополоцк – река Западная Двина и общегородской парк;
  - Орша – река Днепр и детский парк «Сказочная страна»;
  - Мозырь – река Припять;
  - Пинск – река Пина;
  - Солигорск – Солигорское озеро, Общегородской парк и парк «Четырех стихий»;
  - Молодечно – сквер, переходящий в общегородской парк;
- 3) *города с удаленными и (или) не имеющими раскрытия общегородского центра на их главные природные оси (реки, парковые территории) и узлы (озера):*
  - Полоцк – общегородской парк располагается на противоположном от центра берегу реки;
  - Барановичи и Борисов – центр и парковые территории разделяются опорной застройкой;
  - Лида – общегородской парк и центр разделяются общественной застройкой, но при этом имеют хорошее сообщение по улице Ленинской и улице Тавлая;
  - Бобруйск – общегородской центр удален от реки Березины из-за расположения в прибрежной полосе Бобруйской крепости, которая является исторической, её строительство было начато в 1810 году.

Крепость сыграла существенную роль в Отечественной войне 1812 года, а в 2002 году как памятник истории и архитектуры внесена в Государственный список историко-культурных ценностей Беларуси и отнесена к ценностям республиканского значения [7]. Учитывая значимость данного градостроительного ансамбля, ведутся работы по его восстановлению. Создан проект историко-архитектурной регенерации Бобруйской крепости (рис. 17) [8].



Рисунок 17 – Проект реконструкции Бобруйской крепости

**Заключение.** Проанализировав планировочную структуру больших городов Беларуси и их общегородских центров, отметим, что каждый из них имеет богатую историю и неповторимый архитектурный облик. Однако ансамбли главных площадей многих городов все еще требуют вмешательства градостроителей и архитекторов для того, чтобы полностью или частично решить главные проблемы, сформировавшиеся за последнее время:

- однообразная в некоторых городах современная застройка;
- отсутствие доминант;
- контрастная и не гармонирующая между собой в стилевом отношении старогородская и современная застройка;
- отсутствие связи общегородских центров с крупными озелененными территориями (парками общегородского значения), несмотря на высокую степень озелененности городских территорий в целом;
- недостаточное количество пешеходных улиц и бульваров, связывающих основные планировочные узлы или рекреационные объекты;
- высокий рост урбанизации, влекущий негативное антропогенное воздействие на природный ландшафт.

Вместе с тем необходимо отметить, что в последние десятилетия ведется плодотворная работа по улучшению планировочной и пространственной структур некоторых больших белорусских городов, например, Мозырь, Молодечно, Лида. Однако нередко реконструктивные мероприятия, проводимые для общегородских центров, носят фрагментарный характер. На наш взгляд, процесс реконструкции центральных частей городов должен быть комплексным, но для этого потребуются соответствующие финансовые вложения. Осуществляя реконструкцию городской среды, необходимо акцентировать внима-

ние на транспортной и пешеходной системе в целом, разрабатывать новую застройку с учетом старой, представляющей собой историческую ценность, и т.д.

Существенной проблемой для общегородских центров Беларуси продолжает оставаться невыразительность ансамблей главных площадей, которые масштабом, целостностью, пространственным восприятием должны указывать на свою значимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Численность населения на 1 января 2015 г. и среднегодовая численность населения за 2014 год по Республике Беларусь в разрезе областей, районов, городов, поселков городского типа [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Респ. Беларусь. – Режим доступа: [http://belstat.gov.by/bgd/public\\_bulletin/index\\_615](http://belstat.gov.by/bgd/public_bulletin/index_615). – Дата доступа: 28.10.2015.
2. Дорогами Беларуси [Электронный ресурс] // Города Беларуси. – Режим доступа: <http://dorogiby.info/>. – Дата доступа: 15.10.2015.
3. Общественные центры городских населенных мест БССР (опыт формирования, проблемы и направления развития) / Е.Л. Заславский [и др.]; под общ. ред. Е.Л. Заславского. – Минск: Выш. шк., 1991. – 215 с.
4. Борисов (город) [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Борисов\\_\(город\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Борисов_(город)). – Дата доступа: 15.10.2015.
5. Пинск [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пинск>. – Дата доступа: 16.10.2015.
6. Полоцк [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полоцк>. – Дата доступа: 14.10.2015.
7. Бобруйская крепость [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бобруйская\\_крепость](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бобруйская_крепость). – Дата доступа: 20.10.2015.
8. Что ожидает крепость? Интервью с главным архитектором города [Электронный ресурс] // Вечерний Бобруйск. – Режим доступа: <http://bobruisk.ru/news/2010/11/01/4656>. – Дата доступа: 20.10.2015.

*Поступила 02.12.2015*

#### THE FEATURES OF PLANNING ORGANIZATION OF BELARUSSIAN BIG CITIES AND THEIR CITYWIDE CENTRES

**V. MATVEICHUK**

*The article presents a description and analysis of the planning organization of the big cities of Belarus. The connection of the citywide centers with the main cities of transport communications (main street), recreational (citywide parks, promenades, etc.). The monuments of history and architecture, as well as with the main natural axes (rivers) and nodes (lakes). Revealed positive and negative characteristics of urban planning and of the citywide centers. The analysis of the impact of natural and landscape conditions on the formation and development of the citywide centers of the big cities of Belarus.*

УДК 711.553.5

**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ****Д.Н. ПРОКОПОВ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассматриваются логистические комплексы как территориальные объекты промышленной архитектуры. Анализ проводится в рамках архитектурной типологии по таким критериям, как расположение в планировочной структуре города (региона) и функциональное назначение логистических комплексов. Делается вывод, что их создание целесообразно осуществлять поэтапно вокруг крупных городов и на магистралях международных транспортных коридоров, а для успешного функционирования логистических комплексов необходимо взаимодействие и иерархия данных структур как на экономическом и технологическом, так и на градостроительном уровне.*

**Введение.** Сегодня логистические комплексы широко распространены в связи с увеличением уровня интеграции производства и системы транспорта. Данные объекты выступают как современный вид межотраслевого производства, сегодня в мире происходит активное внедрение этих видов производств в планировочную структуру городов. Процесс совершенствования логистического управления товародвижением приводит к усилению интеграции предприятий, участвующих в перемещении товаров – возникают сети логистических комплексов, соответствующих современным техническим и эстетическим требованиям.

Эффективный транспортно-логистический сервис обусловлен созданием системы управления грузопотоками, основанной на терминальной технологии и логистических принципах товародвижения [1]. Использование логистических систем ведет к сокращению транспортных расходов на 7...20%; затраты на погрузоразгрузочные работы и хранение материальных ресурсов и готовой продукции уменьшаются на 15...30%; общие логистические издержки – на 12...35%; ускоряется оборачиваемость материальных ресурсов на 20...40%; запасы ресурсов и готовой продукции снижаются на 50...100% [2].

Необходимость создания такой системы в Республике Беларусь обусловлена следующими факторами:

- наличием глобальных тенденций в мировой торговле, предусматривающих включение Республики Беларусь в основные глобальные транспортные коридоры;
- наличием ряда крупных промышленных узлов с приграничным расположением (Брестский, Гродненский, Витебский, Гомельский, Оршанский) и активно развивающихся городов (Минск);
- уникальным географическим положением Беларуси с точки зрения транзита (страна находится на пересечении международных транспортных коридоров) [1].

Актуальным для Республики Беларусь является создание логистических комплексов различных уровней, образующих в совокупности интегрированную транспортно-логистическую систему. Одно из наиболее перспективных направлений – создание сети региональных логистических комплексов, обеспечивающих повышение координации и взаимодействия различных видов транспорта. Согласно общей схеме размещения транспортно-логистических комплексов в Республике Беларусь региональные комплексы размещаются в областных городах, специализированные – в крупных промышленных центрах, транспортных узлах, местах прохождения международных транспортных коридоров. В настоящее время в республике действует Программа развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2015 года, в соответствии с которой до 2015 года построено 30 логистических комплексов, а в будущем их число должно увеличиться до 50 [3].

**Основная часть.** *Логистический комплекс – это территориальный объект промышленной архитектуры, где реализуются логистические услуги, связанные с современной технологией организации приёма, складирования, комплектации и выдачи товаров. Таким образом, выполняется распределительная функция промышленных товаров. Логистический комплекс организационно и градостроительно является элементом логистической сети на пересечении важнейших транспортных развязок, местах прохождения международных транспортных коридоров.*

С точки зрения *архитектурной типологии* логистические комплексы можно классифицировать по следующим критериям:

- расположение в планировочной структуре города (региона) – определяет и масштаб комплекса;
- функциональное назначение – оказывает влияние на архитектурный облик комплекса.

По *масштабу и размещению в планировочной структуре городов* объекты логистической недвижимости могут быть разделены на следующие типы:

- внутригородские дистрибуционные (распределительные) центры, которые максимально компактны и не нуждаются в инфраструктуре для обслуживания крупного грузового автотранспорта;

- пригородные складские комплексы – это складские объекты, расположенные, как правило, на окружных дорогах;

- логистические парки – это крупные комплексы, расположенные на межселенных территориях с обязательным наличием автомобильной и железнодорожной инфраструктуры.

В зависимости от *функционального назначения* логистические комплексы могут быть представлены следующими видами:

- транспортно-логистические комплексы – мультимодальные грузовые терминалы (с взаимодействием нескольких видов транспорта – автомобильного, железнодорожного, авиационного);

- торгово-логистические комплексы (с наличием в основном оптовых, торговых площадей);

- многофункциональные логистические комплексы, сочетающие в себе складскую, распределительную, торговую, административную и другие функции [3].

Наряду с организацией грузопотоков логистические комплексы могут осуществлять и вокзальные функции по приёму и отправке пассажиров, включают полный состав сервисных, коммерческо-деловых и информационных услуг. Основополагающими элементами логистических комплексов являются многофункциональные терминалы, обеспечивающие взаимодействие различных видов транспорта при грузоперевозках. Кроме того, логистические зоны входят и в состав промышленных узлов, индустриальных парков, являясь важным элементом в системе обслуживания.

Основными производственными процессами для логистических комплексов являются: кратковременное и долговременное хранение грузов; погрузочно-разгрузочные работы; управление заказами и учет складированных товаров; взвешивание и маркировка товаров; формирование партий грузов; предпродажная подготовка товара; дистрибуция грузов (распределение товара по сети сбыта) [5].

В состав современных логистических комплексов с учетом характера работы входят:

- крытые грузовые логистические терминалы, а также крытые и открытые площадки и эстакады для перегрузки, хранения и накопления партий грузов, оснащенные оборудованием для погрузочно-выгрузочных работ; а также места для хранения негабаритных грузов;

- склады различного функционального назначения (оборудованные холодильными и морозильными камерами, для хранения опасных и радиоактивных грузов; склады временного хранения, предназначенные для размещения товаров, находящихся под таможенным контролем) с помещениями бытового назначения;

- открытые контейнерные площадки и открытые площадки для сыпучих грузов;

- административные здания; здания для размещения логистического отдела; офисные здания для участников перевозочного процесса; клиентский зал; помещения для филиалов банков и страховых компаний; служебные помещения для размещения обслуживающего персонала.

Основными зданиями, составляющими застройку логистических комплексов, являются склады. Складирование рассматривается как логистическая операция, заключающаяся в формировании или создании товарных запасов и обеспечивающая их сохранность, рациональное размещение, учет, постоянное обновление и безопасные методы хранения. Современные складские здания представляют собой достаточно сложные технические объекты, состоящие из многочисленных взаимосвязанных элементов и имеющие определенную структуру, технологические и объемно-планировочные решения, конструкции оборудования. Склад рассматривается как интегрированная составная часть логистической цепи, которая формирует основные технические требования к логистическому комплексу. Основными функциональными зонами склада являются зоны приёмки, хранения, комплектации, отгрузки, погрузочно-разгрузочного фронта, вспомогательных и офисных помещений [4]. При проектировании планировки складских помещений логистических комплексов необходимо учитывать класс складских зданий (*A, B, C, D*).

Для *складских комплексов класса A (A+)* характерно:

- месторасположение за чертой города (в зоне 0...30 км от основной городской окружной дороги), на транспортной магистрали, наличие железнодорожной ветки; инфраструктура, необходимая для маневрирования и обслуживания грузового транспорта; площадь застройки 45...55% (40...45% для *A+*), стоянка легковых автомобилей;

- одноэтажные складские здания с пролетом от 24 м и шагом колонн от 6 м (от 12 м для *A+*), высота потолков от 10 м (от 12 м для *A+*); наличие административных и офисных помещений из расчета 100...150 м<sup>2</sup> на 1000 м<sup>2</sup> склада.

*Складские комплексы класса B+* характеризуются такими показателями, как:

- транспортная доступность – 1...2 км от магистральных дорог, площадь застройки 45...55%;

- одноэтажные здания с высотой потолков от 8 м; наличие офисных помещений.

*Складским комплексам класса B* присуще:

- одно- или двухэтажные здания с высотой потолков от 6 м. В случае двухэтажного здания – достаточное количество грузовых лифтов грузоподъемностью не менее 3 тонн (не менее 1 лифта на 2000 м<sup>2</sup>);

- наличие офисных и административных зданий;

- наличие площадок для отстоя и маневрирования большегрузных автомобилей.

Складские комплексы класса С характеризуются следующими особенностями:

- производственные здания или утепленные ангары с высотой потолков от 4 метров. В случае многоэтажного строения – наличие грузовых лифтов/подъемников;
- наличие площадок для отстоя и маневрирования большегрузных автомобилей;
- наличие офисных и вспомогательных зданий.

К складским комплексам класса D относятся:

- неотапливаемые производственные здания;
- ангары.

Геометрические параметры складских зданий – размеры пролетов, шаги колонн и высота этажей – определяются требованиями технологии. Объёмно-планировочные решения складских зданий должны обеспечивать возможность их реконструкции, изменения технологии складирования грузов без существенной перестройки зданий [4]. В отдельную группу по особенностям пространственной организации можно отнести складские здания с технологией вертикального складирования.

К дополнительным характеристикам технического оснащения логистического комплекса относятся: общая площадь территории; общая площадь крытых складских помещений; общая площадь открытых площадок для хранения грузов; площадь контейнерной площадки; суммарная вместимость складских зданий; коэффициент, характеризующий долю проездов и определяемый отношением площади, занимаемой проездами, к общей площади логистического комплекса.

На территории Республики Беларусь логистические комплексы возникли в конце XX века. Первым представителем данной типологической группы стал логистический центр «Санта Бремор», расположенный на территории свободной экономической зоны «Брест». В настоящее время наиболее масштабными существующими, строящимися и проектируемыми логистическими объектами являются: «Прилесье» (Минский район); «Минск-Белтаможсервис» (Минский район); «Щитомиричи» (Минский район); Логистический комплекс в аэропорту «Минск-2» и другие. Они соответствуют международным требованиям по технологической, планировочной и архитектурно-пространственной организации [5].

Основополагающие элементы логистических комплексов – многофункциональные терминалы, обеспечивающие взаимодействие различных видов транспорта при перевозке грузов, транспортировании багажа. В большинстве случаев застройка территории производится масштабными лаконичными складскими зданиями, расположенными ортогонально. Служебные помещения, а также помещения бытового назначения выделяются в отдельные блоки. Вертикальными доминантами логистического комплекса могут выступать офисные здания, выставочные центры, гостиницы. Дополнительными композиционными элементами логистических комплексов также могут быть объекты общественного питания, станции технического обслуживания транспорта, заправочные станции. По своим стилистическим характеристикам здания и сооружения логистических комплексов можно характеризовать как выполненные в стиле «хай-тек» и «конструктивизм».

Объёмно-планировочная композиция логистических комплексов в большинстве случаев характеризуется равномерным распределением зданий, сооружений и элементов ландшафтной организации, значительную часть территории занимают проезды и места для отстоя транспорта. Территория логистического комплекса ограждается или обозначается, при необходимости имеет разметку, знаки, светофоры и другие элементы устройства дорог, а также освещение, соответствующее установленным нормам. Эти элементы целесообразно проектировать на основе единого стиля. Особое внимание при проектировании уделяется зданиям и сооружениям, расположенным вдоль основных транспортных магистралей: складские здания, выходящие на магистрали своими фасадами, отличаются образным и цветовым решением. Для архитектурной выразительности в условиях восприятия объектов с транспортных магистралей используется суперграфика и элементы средового дизайна.

При проектировании логистических комплексов целесообразно ориентироваться на существующие транспортные узлы, магистральные и местные пути сообщения – формировать рациональную схему размещения логистических комплексов для повышения эффективности грузоперевозок. Планировочная структура территории крупных логистических комплексов определяется делением на модули стандартной конфигурации (квадратная, прямоугольная модульная сетка). В архитектурном проекте логистического комплекса необходимо реализовать требуемые объёмно-планировочные решения для обеспечения функционирования разработанной технологии работы комплекса; обеспечить наличие помещений требуемых назначений, площадей и категорий; применить обоснованные конструктивно-технические решения, обеспечивающие надёжность и экономичность эксплуатации комплекса.

Логистические комплексы формируют широкий спектр возможностей для реализации стратегии устойчивого развития, а также для охраны окружающей среды. Формирование логистических комплексов поддерживает концепцию комбинированного и интермодального транспорта, что вносит существенный вклад в развитие европейской транспортной системы. Их создание целесообразно осуществлять поэтапно вокруг крупных городов и на магистралях международных транспортных коридоров, что обеспе-

чит совершенствование организации внешнеторговых и транзитных грузоперевозок в Республике Беларусь. Для успешного функционирования логистических комплексов необходимо взаимодействие и иерархия данных структур как на экономическом и технологическом, так и на градостроительном уровне.

На основе анализа планировочных и архитектурно-пространственных решений логистических комплексов и с учетом тенденций развития промышленного комплекса Республики Беларусь можно сделать следующие основные **выводы**:

- в рамках архитектурной функциональной типологии логистический комплекс определяется как территориальный объект промышленной архитектуры, основными функциями которого являются складирование и распределение (дистрибуция) промышленной продукции, дополнительными функциями – торговля, сервисные, коммерческо-деловые и информационные услуги; вокзальные функции; логистические комплексы классифицируются в зависимости от расположения в планировочной структуре города (региона) и функционального назначения;

- основными зданиями логистических комплексов являются складские здания и грузовые терминалы; дополнительными – административно-деловые центры, гипермаркеты, пассажирские терминалы, офисные здания, станции технического обслуживания, заправочные станции;

- наиболее целесообразно размещение логистических комплексов в местах прохождения крупных транспортных коридоров, на территории существующих транспортных узлов; оптимальное условие для размещения логистического комплекса определяется наличием транспортной инфраструктуры, представленной несколькими видами транспорта (железнодорожная ветка, автомобильная магистраль);

- в случае если на территориях промышленных предприятий и узлов необходима логистическая зона, возможно создание складов на основе реновации производственных зданий;

- в большинстве случаев логистические комплексы расположены в периферийной части городов либо на межселенных территориях – в таких случаях основу застройки составляют одно-, двухэтажные складские здания. Однако логистические объекты могут находиться и в центральной части городов – в таком случае необходимо применять многоэтажную пространственную технологию складирования, учитывать стилистику окружающей застройки при разработке архитектурного решения высотного складского здания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, Ф.Ф. Транспортно-логистическая система Республики Беларусь: Формирование и развитие / Ф.Ф. Иванов; под науч. ред. С.А. Пелиха. – Минск: Право и экономика, 2011. – 160 с.
2. Прокофьева, Т.А. Формирование транспортно-логистической инфраструктуры России / Т.А. Прокофьева, С.Ю. Платонов // Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. – 2005. – № 2. – С. 4.
3. Программа развития логистической системы Республики Беларусь на период до 2015 года: утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь от 29 авг. 2008 г. № 1249 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2008. – № 223. – 5/28285; 2009. – № 1. – 5/28978.
4. Складские здания: Строительные нормы и правила СНиП 31-04-2001 / Государственный Комитет Рос. Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). – М., 2011.
5. Официальный сайт Министерства транспорта Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.mintrans.gov.by/rus/translogistic\\_306/translogistic\\_004](http://www.mintrans.gov.by/rus/translogistic_306/translogistic_004). – Дата доступа: 04.04.2015.

Поступила 08.12.2015

#### FEATURES OF THE FUNCTIONAL AND SPATIAL ORGANIZATION OF LOGISTIC COMPLEXES

**D. PROKOPOV**

*In this article logistic complexes as territorial objects of industrial architecture are considered. The analysis is carried out within architectural typology by such criteria as an arrangement in planning structure of the city (region) and to a functional purpose of logistic complexes. Typological borders of research are defined by complex consideration of the functional, planning and architectural and spatial organization when forming logistic complexes. It is concluded that their creation is expedient for carrying out step-by-step around the major cities and on the highways of international transport corridors, and for the successful operation of logistics facilities interaction and a hierarchy of data structures is necessary both economic and technological, as well as on the level of city planning.*

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.151.1

### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ УШИРЕННЫХ ЦЕНТРАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ФУНДАМЕНТОВ

*канд. техн. наук, доц. В.Н. КИСЕЛЁВ; А.И. ГИЛЬ*  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены практические рекомендации по проектированию уширенных центрально нагруженных фундаментов. Предложенная методика определения осадки фундаментов основана на использовании формулы Шлейхера. Разработанная методика рассмотрена на конкретных примерах, результаты которых сравнивались с экспериментальными значениями. Предложенный способ расчёта осадок дает достаточно хорошую сходимость результатов с натурными испытаниями. Рекомендовано применение для расчёта осадки фундамента, возводимого способом уширения для инженерных расчётов.*

При определении расчётного сопротивления грунта основания необходимо учитывать, что в результате длительного нагружения строительные свойства грунтов обычно улучшаются, что позволяет назначать повышенное по сравнению с расчётным (по ТКП 45-5.01-67-2007 [1]) сопротивление грунта [2].

В работах [3] на основе экспериментальных исследований, а также анализа материалов изысканий приводятся эмпирические формулы для определения углов внутреннего трения и удельного сцепления песчаных грунтов, отвечающих рассматриваемому моменту времени  $t$ :

- пески средней крупности

$$\begin{aligned}\varphi_t &= \varphi_0 + 0,0614t; \\ c_t &= c_0 + 0,000372t;\end{aligned}\tag{1}$$

- пески мелкие

$$\begin{aligned}\varphi_t &= \varphi_0 + 0,0369t; \\ c_t &= c_0 + 0,000490t;\end{aligned}\tag{2}$$

- пески пылеватые

$$\begin{aligned}\varphi_t &= \varphi_0 + 0,0662t; \\ c_t &= c_0 + 0,000109t.\end{aligned}\tag{3}$$

Здесь  $\varphi_0$  и  $\varphi_t$  – углы внутреннего трения соответственно до момента нагружения и через промежуток времени  $t$  после нагружения;  $c_0$  и  $c_t$  – удельное сцепление до момента нагружения и через промежуток времени  $t$  после нагружения;  $t$  – время в годах.

С учётом этих зависимостей повышенное расчётное сопротивление песков рекомендуется определять из выражения

$$R_{нов} = R_{\varphi c} K_E,\tag{4}$$

где  $R_{\varphi c}$  – расчётное сопротивление песка, полученного по формулам (1)–(3) и ТКП 45-5.01-67-2007;  $K_E$  – коэффициент, учитывающий улучшение строительных свойств грунтов в результате длительного нагружения (значения  $K_E$ , полученные в работе [3], приведены в таблице 1).

Величину уширения фундамента  $\Delta L = (L - l)$  следует назначать из условия, что средние нормальные давления  $P_{cp}$  (рис. 1) на грунт основания не будут превышать расчётное сопротивление  $R_{нов}$ . Здесь важно помнить, что подсоединённые участки фундамента создают боковые пригрузки, которые препятствуют распространению зон пластических деформаций, возникающих до его наращивания. Поскольку это обстоятельство создает дополнительный запас прочности основания, то сопротивление

грунта  $R_{нов}$  можно увеличить, если расчётные осадки фундамента не превышают допустимые по условиям эксплуатации.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $K_E$

Вид грунта	Предшествующее дополнительному загружению фактическое давление, МПа	Длительность загрузки основания, t, год			
		20	40	60	80
Пески крупные и средней крупности, средней плотности	0,1	10,2	1,04	1,06	1,1
	0,2	1,1	1,15	1,18	1,25
	0,3	1,25	1,332	1,40	1,5
	0,4	1,45	1,48	1,50	1,55
Пески мелкие, пылевые, средней пыльности и плотные	0,1	1,06	1,15	1,25	1,35
	0,2	1,13	1,25	1,35	1,48
	0,3	1,18	1,35	1,55	1,70
	0,4	1,08	1,25	1,40	1,65

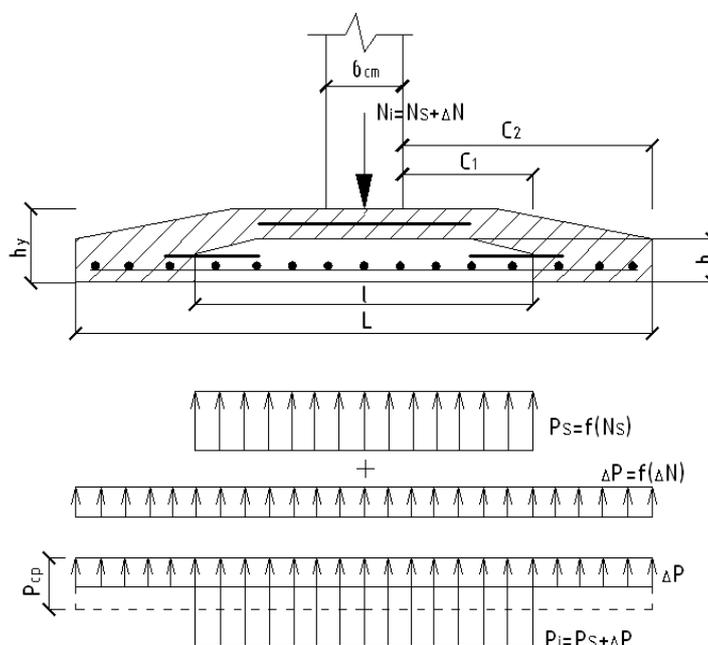


Рисунок 1 – Расчётная схема уширенного фундамента в предположении кусочно-ленточного распределения реактивного давления

Требуемая высота усиливаемого фундамента  $h_y$ , рассчитываемого на изгиб (см. рис. 1), при усилении материалом, прочностные и деформативные свойства которого идентичны основному, должна определяться из выражения (5), а в случае усиления иным материалом – из выражения (6):

$$h_y = \sqrt{\frac{(\theta - \sigma_{1y} / R)}{(1/h^2 - \sigma_{1y} / R)}}, \quad (5)$$

$$h_y = \sqrt{\frac{(\psi_1 - \sigma_{1y} / R)}{n_1(1/h^2 - \sigma_{1y} / R)}}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – степень повышения первоначальной несущей способности фундаментного элемента после усиления (определяется по формуле  $\theta = S_0 / S$ );  $\sigma_{1y}$  – ремонтное напряжение (в период работ по усилению) на грани сечения усиливаемого элемента;  $R$  – расчётное сопротивление материала существующего фун-

дамента;  $h$  – первоначальная высота сечения;  $n_1$  и  $\psi_1$  – расчётные параметры, определяемые по следующим формулам:

$$n_1 = \frac{K(1 - \nabla_1^2) + \nabla_1^2}{2\nabla_1 + 2K(1 - \nabla_1)}, \quad (7)$$

$$\psi_1 = \nabla_1^2(3n_1 - \nabla_1) + 3\nabla_1(n_1 - \nabla_1)(2n_1 - \nabla_1) + 2K(n_1 - \nabla_1)^3 + 2K(1 - n_1)^3. \quad (8)$$

Здесь  $K$  – соотношение модулей упругости усиливающего и основного материалов,  $K = E_{\sigma 2} / E_{\sigma 1}$ ;  $\nabla_1$  – относительная высота усиленного элемента,  $\nabla_1 = h / h_y$ .

Заметим, что не во всех случаях усиления фундаментов требуется увеличить высоту их сечения. Как известно, прочностные характеристики бетона в благоприятных естественных условиях возрастают во времени. Для оценки этого фактора может быть использовано выражение

$$R_t = R_{28} \frac{\lg t}{\lg 28}, \quad (9)$$

где  $R_t$  – прочность бетона на момент времени  $t$ ;  $R_{28}$  – прочность бетона в возрасте 28 суток;  $t$  – время в днях с момента изготовления бетонного элемента.

Поэтому рекомендуется каждый фундамент перед проектированием усиления подвергать исследованию с целью определения фактических характеристик материала.

Для того чтобы воспользоваться выражениями (5)–(6), необходимо определить показатель  $\theta$ , который в случае расчёта изгибаемых элементов определяется как

$$\theta = M_i / M_s. \quad (10)$$

Здесь  $M_i$  – изгибающий момент, который может воспринять усиленная фундаментная плита;  $M_s$  – фактический изгибающий момент в том же сечении до усиления.

Используя предположение о кусочно-равномерном распределении контактного давления на подошве усиленного фундамента, нетрудно получить приближённое выражение для определения  $\theta$ .

В соответствии с принятыми обозначениями (см. рис. 1) изгибающий момент по грани стены после усиления

$$M_i = \frac{p_s c_1^2 + \Delta p c_2^2}{2} = \frac{\frac{N_s}{l} c_1^2 + \frac{(N_i - N_s)}{L} c_2^2}{2}, \quad (11)$$

то же до усиления:

$$M_s = \frac{p_s c_1^2}{2} = \frac{\frac{N_s}{l} c_1^2}{2}, \quad (12)$$

откуда

$$\theta = 1 + \frac{(N_i - N_s) l c_2^2}{N_s L c_1^2}. \quad (13)$$

После назначения геометрических размеров уширяемого фундамента производится окончательный расчёт его тела, учитывающий последовательность возведения и различную деформативность грунта в центре и под краями. Деформационные характеристики основания могут определяться по результатам парных статических испытаний штампов малой площади с кольцевой пригрузкой непосредственно в эксплуатируемых зданиях. При этом одно испытание следует производить с заведением штампа под подошву фундамента, а второе – в непосредственной близости от места первого в зоне последующего уширения фундаментной плиты.

Для облегчения расчёта в таблице 2 приведены значения  $\theta = M_i / M_0$  (определяются по формуле  $\theta = N_{st} / N_{il} + (1 - N_s / N_i)$ ), характеризующие степень уменьшения изгибающих моментов в уширенной плите по отношению к аналогичным моментам в плите, возведённой при строительстве объекта. Для то-

го чтобы использовать данные этой таблицы, необходимо определить изгибающие моменты в обычной плите тех же конечных размеров, несущей равную нагрузку с уширенной. Затем в зависимости от значений отношений  $l/L$  и  $N_s/N_i$ , используя выражение (14), можно найти величину максимального изгибающего момента  $M_i$  в усиленном фундаменте:

$$M_i = \theta_1 M_0, \quad (14)$$

где  $M_0$  – лимитирующий изгибающий момент в обычном листе;  $\theta_1$  – показатель степени уменьшения изгибающих моментов, значения которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения  $\theta_1$

Относительный уровень нагрузок $N_s/N_i$	Отношение начальной ширины фундамента к конечной $l/L$				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
0,4	0,76	0,80	0,84	0,84	0,92
0,5	0,7	0,75	0,80	0,85	0,90
0,6	0,64	0,70	0,76	0,82	0,88
0,7	0,58	0,65	0,72	0,79	0,86
0,8	0,52	0,60	0,68	0,76	0,84

Заключительным этапом расчёта является подбор арматуры фундаментной плиты в соответствии с определёнными эпюрами изгибающих моментов и перерезывающих сил.

В практических расчётах дополнительная осадка  $\Delta s$  уширенного фундамента может определяться одним из методов [5], реализующих расчётную схему в виде линейно-деформируемого полупространства и рекомендованных нормами [1]. При этом осадка  $\Delta s$  определяется от добавочной нагрузки  $\Delta N$ , действующей по всей площади усиленного фундамента.

Конструктивные схемы усиления фундаментов могут быть следующими. По первой схеме производится оголение примыкающей к краю существующего фундамента арматуры, приварка к ней стальных выпусков и последующее бетонирование. По второй – высверливание перфораторами отверстий в теле фундамента, вставка в них арматурных стержней в виде выпусков, замоноличивание этих выпусков путём инъецирования цементного раствора, окончательное бетонирование.

Для определения осадки (без ЭВМ) фундамента, возводимого способом уширения, может быть рекомендован метод, который основан на использовании формулы Шлейхера. Осадку фундамента в таком случае составит

$$s_s = \frac{\omega_1 (1 - \mu^2) N_s}{\sqrt{F_s E_1}}, \quad (15)$$

где  $F_s$  – площадь подошвы фундамента до уширения;  $\omega_1$  – коэффициент, зависящий от формы подошвы фундамента до уширения (табл. 3);  $E$  – модуль деформации грунта основания.

Таблица 3 – Значения коэффициента  $\omega_k$  формуле Шлейхера

Форма загрузки площади	$\omega_c$ (угловые точки)	$\omega_0$ (центр)	$\omega_m$ (средняя осадка)	$\omega_{const}$ (абсолютно жёсткие)
Круг	0,64	1,00	0,85	0,79
Квадрат: $\alpha = a/b = 1$	0,56	1,12	0,95	0,88
Прямоугольники				
$\alpha = 1,5$	0,68	1,36	1,15	1,08
$\alpha = 2,0$	0,77	1,53	1,30	1,22
$\alpha = 3,0$	0,89	1,78	1,53	1,44
$\alpha = 4,0$	0,98	1,96	1,70	1,61
$\alpha = 5,0$	1,05	2,10	1,83	1,72
$\alpha = 6,0$	1,12	2,23	1,96	–

Дополнительная осадка определяется по формуле:

$$\Delta s = \frac{\omega_2(1-\mu^2)(N_i - N_s)}{\sqrt{F_i}E_2}, \quad (16)$$

где  $F_i$  – окончательная площадь подошвы фундамента;  $\omega_2$  – коэффициент, зависящий от формы подошвы уширенного фундамента (см. табл. 3);  $E$  – модуль деформации грунта основания.

Полная осадка уширенного фундамента

$$s = s_s + \Delta s = \frac{(1-\mu^2) \left[ \omega_1 N_s \sqrt{F_i} E_2 + \omega_2 (N_i - N_s) \sqrt{F_s} E_1 \right]}{\sqrt{F_s} F_i E_1 E_2}. \quad (17)$$

Осадка аналогичного фундамента, загруженного после полного его возведения, определяется как

$$s_0 = \frac{\omega_2(1-\mu^2)N_i}{\sqrt{F_i}E_1}. \quad (18)$$

Отношение осадок рассматриваемых фундаментов:

$$k = \frac{s}{s_0} = \frac{\omega_1 \sqrt{F_i} E_2 N_s + \omega_2 \sqrt{F_s} E_1 (N_i - N_s)}{\omega_2 \sqrt{F_s} E_2 N_i} = \frac{\sqrt{F_i / F_s} \cdot \omega_1 / \omega_2 N_s + E_1 / E_2 (N_i - N_s)}{N_i}, \quad (19)$$

или

$$k = (a-b)N_s / N_i + b, \quad (20)$$

где  $a = \sqrt{F_i / F_s} \cdot \omega_1 / \omega_2$ ;  $b = E_1 / E_2$ .

Осадка уширенного фундамента, таким образом, может быть определена из выражения

$$s = ks_0. \quad (21)$$

Здесь  $s_0$  – осадка аналогичного фундамента, возведенного традиционным способом, определенная в соответствии с рекомендациями [1].

Известно, что предпосылки, используемые при выводе формулы Шлейхера, не в полной мере учитывают условия работы грунта под реальным фундаментом. Однако отношения между осадками фундаментов, вычисленными иными способами, мало отличаются от отношения между осадками тех же фундаментов, определенными по формуле Шлейхера. Это даёт возможность определять осадку уширенного фундамента по осадке соответствующего ему возведенного в один приём фундамента, используя зависимость (21).

Далее рассмотрим предложенную методику на примерах.

Пример 1. Определить значение  $k$  для центра уширенного фундамента при следующих данных:

$$F_s = 0,48 \cdot 0,48 \text{ м} = 0,23 \text{ м}^2; F_i = 0,48 \cdot 0,96 \text{ м} = 0,46 \text{ м}^2;$$

$$F_s = 0,48 \cdot 0,48 \text{ м} = 0,23 \text{ м}^2; F_i = 0,48 \cdot 0,96 \text{ м} = 0,46 \text{ м}^2;$$

$$\mu = 0,3; E_1 = 6,7 \text{ МПа}; E_2 = 1,0 \text{ МПа}; N_s = 84,0 \text{ кН}; N_i = 139,2 \text{ кН}.$$

Данные соответствуют натурным опытам, проведенным с фундаментной плитой.

В соответствии с таблицей 3 получим следующее решение:

$$\omega_1 = 1,12; \omega_2 = 1,53; a = \sqrt{0,46 / 0,23} \cdot 1,12 / 1,53 = 1,035; b = 6,7 / 1,0 = 6,70;$$

$$N_s / N_i = 84,0 / 139,2 = 0,603; k = (1,035 - 6,70) \cdot 0,603 + 6,70 = 3,28.$$

В эксперименте

$$k_s = 22,3 \text{ мм} / 8,1 \text{ мм} = 2,75.$$

Пример 2. Определить значение  $k$  для центра уширенного фундамента, имея следующие данные:

$$F_s = 0,48 \cdot 0,48 \text{ м} = 0,23 \text{ м}^2; F_i = 0,48 \cdot 0,96 \text{ м} = 0,46 \text{ м}^2;$$

$$\mu = 0,3; E_1 = 19,5 \text{ МПа}; E_2 = 4,4 \text{ МПа}; N_s = 44,7 \text{ кН}; N_i = 115,9 \text{ кН}.$$

Данные соответствуют натурным опытам, проведенным с фундаментной плитой.

В соответствии с таблицей 3 получим следующее решение:

$$\omega_1 = 1,12; \omega_2 = 1,53; a = \sqrt{0,46 / 0,23} \cdot 1,12 / 1,53 = 1,035; b = 19,5 / 4,4 = 4,43;$$

$$N_s / N_i = 44,7 / 115,9 = 0,386; k = (1,035 - 6,70) \cdot 0,386 + 4,43 = 3,12.$$

В эксперименте

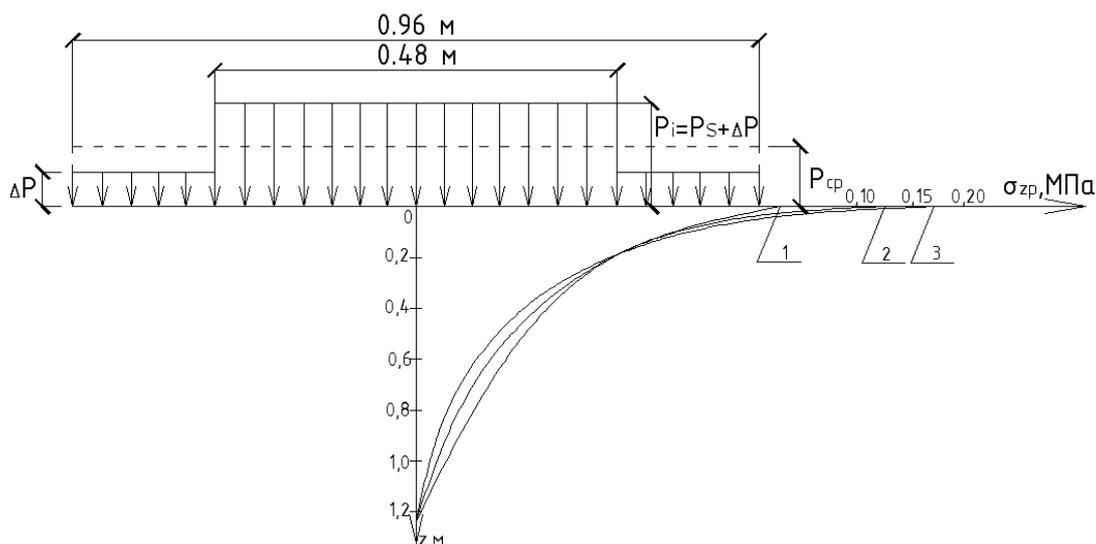
$$k_s = 18,7 \text{ мм} / 6,9 \text{ мм} = 2,71.$$

Из рассмотренных примеров следует, что предложенный способ расчёта осадок дает достаточно хорошую сходимость результатов натурных опытов.

При анализе формулы (19) нетрудно заметить, что осадки уширенного под нагрузкой фундамента будут превышать осадки обычного фундамента ( $k > 1$ ). Представляется логичным, что увеличение осадок происходит в основном за счёт большей деформации слоя грунтового массива мощностью  $h_1$ , залегающего непосредственно под подошвой уширенного фундамента. В этом слое будут действовать большие дополнительные вертикальные напряжения по сравнению с аналогичными при одноэтапном возведении опорного элемента. Общеизвестно, что распределение напряжений и деформаций для внутренних точек тела (при недостаточном удалении их от границы) слабо зависит от закона распределения статически эквивалентной нагрузки на границах тела (принцип Сен-Венана). Поэтому, начиная с некоторой глубины, напряжённо-деформированное состояние грунтового массива будет почти одинаковым как в случае поэтапного, так и в случае традиционного возведения.

С целью возведения этой глубины авторами при помощи программы, реализующей метод граничных элементов, просчитан ряд примеров загрузки поверхности грунтового массива. Условия загрузки отвечали как одноэтапному возведению фундамента, так и воздействию статически эквивалентной нагрузки в случае поэтапного возведения.

На рисунке 2 проиллюстрированы результаты отдельных расчётов.



- 1 – возведение в один приём ( $p_{cp} = 0,1 \text{ МПа}$ );  
 2 – уширенный фундамент ( $p_s = 0,15 \text{ МПа}$ ;  $\Delta p = 0,05 \text{ МПа}$ )  
 3 – то же ( $p_s = 0,17 \text{ МПа}$ ;  $\Delta p = 0,03 \text{ МПа}$ )

Рисунок 2 – Эпюра вертикальных напряжений в грунтовом массиве под центром фундаментной полосы

Видно, что, начиная с глубины 0,6 м, эпюры вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_z$  под центром фундамента практически не имеют отличий.

Таким образом, на основании изложенного для расчёта осадки  $s$  возводимого способом уширения фундамента (в случае использования метода послойного суммирования) может быть рекомендовано следующее выражение:

$$s = ks_1 + \sum_{i=2}^n s_i, \quad (22)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение осадки и определяемый по формуле (19);  $s_1$  – осадка слоя толщиной  $h_1$ , залегающего непосредственно под подошвой фундамента, вычисленная по формуле СНиП 2.02.01-83;  $s_i$  – осадка  $i$ -того слоя грунта, определенная в соответствии с рекомендациями СНиП;  $n$  – число слоёв, на которые разбита сжимаемая толща основания.

В инженерных расчётах рекомендовано принимать значение  $h_1$ , равное  $0,5 \dots 0,6b$  ( $b$  – окончательная ширина фундамента).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67-2007 (02250) / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2008.
2. Пособие по проектированию фундаментов на естественном основании под колонны зданий и сооружений (к СНиП 2.03.01-84 и СНиП 2.02.01-83).
3. Далматов, Б.И. Фундаменты зданий на слабых грунтах / Б.И. Далматов // Труды VII Дунайско-Европейской конф. по механике грунтов и фундаментостроению. – Кишинев, 1983.
4. Далматов, Б.И. Проектирование и устройство фундаментов около существующих зданий / Б.И. Далматов. – Л.: ЛДНТП, 1973.
5. Ежов, Е.Ф. Исследование дополнительных осадок фундаментов сооружений при устройстве около них ограждающих шпунтовых стенок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Ф. Ежов. – Л., 1980.

Поступила 27.11.2015

#### PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR DESIGNING BROADENING CENTRAL LOADED FOUNDATION

V. KISELEV, A. HIL

*This paper presents practical advice on designing broadening of the central bases loaded. The proposed method of determining the basis of foundations precipitation Wang on the use of formula Schleicher. The developed technique discussed with specific examples, the results of which were compared with the experimental values. The proposed method of calculating the residue gives a fairly good agreement with the results of field tests. Recommended expression for the calculation of precipitation foundation erected a way of broadening for engineering calculations.*

УДК 624.131.37:624.131.43

## ВЛИЯНИЕ «СТЕСНЕННОЙ» ДИЛАТАНСИИ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

*канд. техн. наук, доц. Т.М. УЛАСИК*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Исследуется явление дилатансии, проявляющееся в несвязных грунтах и служащее важным фактором повышения несущей способности свайных фундаментов. Для свайных фундаментов контактное трение, формирующееся на боковой поверхности, ведет к мобилизации прочности несвязного грунта, при этом мобилизуется не только минеральное трение в грунте, но и трение зацепления. Различие значений несущей способности забивных свай и свай-оболочек, определенное без учета и с учетом дилатансии, доказывает значимость этого явления в геотехнической практике. Для изучения влияния «стесненной» дилатансии и измененных условий стеснения на несущую способность забивной сваи проведены специальные лабораторные испытания с моделированием работы сваи в песке среднем, по результатам которых сделан вывод, что простейшие изменения условий стеснения несвязного грунта ведут к увеличению несущей способности сваи.*

**Введение.** В практике устройства фундаментов глубокого заложения все чаще применяются конструктивные решения, базирующиеся на максимальном включении в работу сопротивления окружающего грунта сжатию за счет создания дополнительных условий стеснения среды. Явление «стесненной» дилатансии, детально описанное в трудах Д.Ю. Соболевского [1], указывает на реальную возможность увеличения несущей способности фундаментов глубокого заложения (в частности, свайных фундаментов) за счет изменения условий «стеснения». Это ведет к увеличению значений расчетного сопротивления несвязных грунтов на боковой поверхности забивных свай и свай-оболочек.

Чтобы добиться максимальной мобилизации контактного трения на боковой поверхности забивной сваи, необходимо изменить условия «стеснения» несвязного грунта таким образом, чтобы его плотность повысилась относительно начальных условий работы сваи. Дилатантные напряжения  $\Delta\sigma_d$ , или дилатантный распор, возникающие у контактной поверхности, в зоне упругих деформаций, также возрастут, согласно исследованиям профессора Д.Ю. Соболевского: «...ограничение дилатансии приводит к изменению напряженного состояния грунта вследствие возникновения распора при переупаковке зёрен», а также «...возникающие дилатантные напряжения тем выше, чем жестче массив, плотнее грунт» [1].

В современной геотехнике неотъемлемой частью испытаний фундаментов глубокого заложения является определение сопротивления вдавлению. Зачастую величины контактного трения существенно отличаются от вычисленных по нормативным документам. Причина подобных расхождений – дилатансия и мобилизация прочности несвязного грунта в связи с ограничением дилатансии, или с проявлением «стесненной» дилатансии. Это явление неотъемлемо связано с базовой характеристикой несвязного грунта – углом внутреннего трения  $\varphi$ , который складывается из минерального трения  $\varphi_\mu$  и трения зацепления  $\varphi_g$ :

$$\varphi = \varphi_\mu + \varphi_g. \quad (1)$$

Изменение условий «стесненной» дилатансии при увеличении плотности несвязного грунта неизменно ведет к росту компоненты зацепления. Для того чтобы показать, какие простейшие способы изменения условий при «стесненной» дилатансии возможны, были проведены лабораторные испытания несвязного грунта.

**Исследование влияния изменений условий «стесненной» дилатансии на несущую способность забивных свай.** Определение несущей способности забивной сваи, ( $F_d$ ), кН, работающей на сжимающую нагрузку, осуществляют в соответствии с нормативным документом [2]:

$$F_d = \gamma_c(\gamma_{cr}RA + \sum U_i \gamma_{cf} h_i R_{fi}), \quad (2)$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы сваи в грунте;  $R$  – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, кПа, принимаемое по таблице;  $A$  – площадь опирания на грунт сваи, м<sup>2</sup>, принимаемая по площади поперечного сечения сваи брутто;  $U_i$  – усредненный периметр поперечного сечения ствола сваи в  $i$ -том слое грунта, м;  $R_{fi}$  – расчетное сопротивление (прочность)  $i$ -того слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, кПа;  $h_i$  – толщина  $i$ -того слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;  $\gamma_{cr}$ ,  $\gamma_{cf}$  – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа погружения сваи на расчетные сопротивления грунта.

Для сравнения результатов расчетных значений несущей способности, а также значений были выбраны пески средние среднеоднородные. Результаты вычисленных расчетных значений для разных длин свай (сечением 100×100 мм) без учета явления дилатансии [2] и с учетом ее [3] приведены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1 – Несущая способность свай и свай-оболочек без учета и с учетом дилатансии (для свай в диапазоне 5...8 м)**

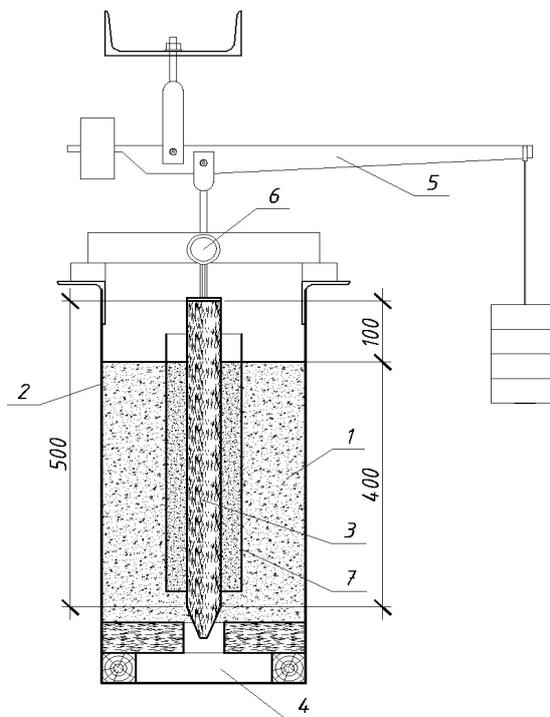
Несущая способность свай и свай-оболочек без учета и с учетом дилатансии												
Длина сваи $l$ , м												
5	5,25	5,5	5,75	6	6,25	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75	8
<u>760,8</u>	<u>786,5</u>	<u>810</u>	<u>834</u>	<u>858,2</u>	<u>883,6</u>	<u>907,4</u>	<u>935,5</u>	<u>958,5</u>	<u>984,1</u>	<u>1011</u>	<u>1036</u>	<u>1061</u>
1258	1309	1359	1411	1460	1511	1562	1612	1663	1714	1765	1816	1865
Несущая способность сваи без учета дилатансии $F_d$ , кН, (числитель), с учетом дилатансии $F'_d$ , кН, (знаменатель).												

**Таблица 2 – Несущая способность свай и свай-оболочек без учета и с учетом дилатансии (для свай в диапазоне 8,25...12 м)**

Несущая способность свай и свай-оболочек без учета и с учетом дилатансии												
Длина сваи $l$ , м												
8,25	8,5	8,75	9	9,25	9,5	9,75	10	10,25	10,5	10,75	11	12
<u>1087</u>	<u>1116</u>	<u>1140</u>	<u>1164</u>	<u>1190</u>	<u>1215</u>	<u>1238</u>	<u>1264</u>	<u>1289</u>	<u>1315</u>	<u>1340</u>	<u>1364</u>	<u>1466</u>
1916	1966	2016	2067	2068	2069	2070	2071	2167	2263	2360	2456	2670
Несущая способность сваи без учета дилатансии $F_d$ , кН, (числитель), с учетом дилатансии $F'_d$ , кН, (знаменатель).												

Приведенные расчеты показывают, что использование скорректированного значения сопротивления на боковой поверхности сваи [3] для учета явления «стесненной» дилатансии существенно влияет на определение её несущей способности.

С тем чтобы определить возможные варианты изменения условий стеснения несвязного грунта, проведены лабораторные испытания в массиве песка среднего, средней прочности с использованием лоткового оборудования. Для вычленения в ходе опытов работы сваи только с учетом изменения трения по боковой поверхности, в нижней части лотка (рис. 1) устроена полость, куда после исчерпания несущей способности опускалась свая. Полость моделировалась с помощью деревянных элементов, для исключения соприкосновения нижнего конца сваи с грунтом основания.



1 – несвязный грунт; 2 – лоток; 3 – модель сваи; 4 – полость под нижним концом модели сваи; 5 – рычаг с подвешенным грузом для передачи нагрузки; 6 – индикатор часового типа; 7 – труба ПВХ

**Рисунок 1 – Схема испытаний модели сваи в условиях с дополнительным «стеснением»**

Основные характеристики исследований поведения забивной сваи с изменением условий «стеснения»: испытания проводились в металлическом лотке, заполненном песком средним среднеоднородным ( $\gamma = 1,8 \text{ кН/м}^3$ ,  $\omega = 5\%$ ,  $\varphi = 26$  град), моделировалась забивная свая, показанная на рисунке 2.



*а)* – свая, защемленная в несвязном грунте; *б)* – нагружение сваи

**Рисунок 2 – Проведение испытания модели сваи без создания условий дополнительного «стеснения»**

Мобилизация контактного трения вдоль боковой поверхности в данном случае происходила при планомерном увеличении нагрузки на модель сваи. Индикатором часового типа ИЧ-25 фиксировалось перемещение модели сваи.

Второй этап испытаний показан на рисунке 3. Использовался тот же несвязный грунт, что и в предыдущих испытаниях, с такими же физическими характеристиками. На этом этапе формируются условия «стеснения» модели сваи с помощью погружения вокруг нее трубы ПВХ. Труба погружалась на всю длину модели сваи. В этом случае вокруг сваи образуется область дополнительного «стеснения», контактное трение по поверхности модели сваи формируется за счет увеличения дилатантного распора. Подобная своеобразная оболочка для сваи в реальных условиях может быть не обязательно круглого сечения.

На рисунке 3 (*а, б*) показан общий вид испытаний сваи в лотке без создания дополнительных условий «стеснения» для работы сваи.



*а)* – свая, защемленная в несвязном грунте; *б)* – нагружение сваи

**Рисунок 3 – Проведение испытания модели сваи без создания условий дополнительного «стеснения»**

Сравнение результатов испытаний [4; 5] без создания дополнительных условий «стеснения» и с погружением вокруг сваи трубы ПВХ показало, что во втором случае имеет место значительное уменьшение перемещения трубы. Данные одного из таких сравнительных испытаний приведены в таблице 3.

**Таблица 3 – Перемещения модели сваи, полученные по двум схемам испытаний**

Без условий «стеснения»		С дополнительным «стеснением» в виде трубы	
нагрузка, Н	перемещение сваи, мм	нагрузка, Н	перемещение сваи, мм
0	0	0	0
200	114	200	73
400	297	400	241
600	450	600	374
800	587	800	489
1000	756	1000	554
нет	нет	1200	791

Проведенные испытания свидетельствуют о том, что с изменением условий «стеснения», несущая способность модели сваи возрастает. Так, для опытов по первой схеме  $F_d = 1,0$  кН, а в условиях дополнительного «стеснения»  $F_d = 1,2$  кН. Следовательно, при увеличении области «стеснения» в опытах происходит и увеличение несущей способности модели сваи.

Площадь сечения модели сваи составила  $25 \text{ см}^2$ , а площадь области «стеснения» в плане –  $30,25 \text{ см}^2$ , что на 21% больше площади сечения сваи. При этом произошло увеличение несущей способности модели сваи в условиях «стеснения» на 20%. Следовательно, параметры области «стеснения» влияют на несущую способность сваи, заземленной в грунте.

Возможны также различные варианты погружения трубы, моделирующей «стеснение» сваи, то есть не на всю длину сваи, что позволит влиять на значение несущей способности сваи.

Таким образом, проведенные исследования поведения модели сваи в несвязном грунте с вычленением контактного трения по боковой поверхности сваи позволяют сделать следующие **выводы**:

- «стесненная» дилатансия является важным фактором повышения несущей способности свайных фундаментов;

- расхождения в значениях несущей способности свай без учета явления дилатансии и при ее учете возникают за счет мобилизации прочности несвязного грунта;

- изменение условий «стеснения» модели сваи позволяет увеличить несущую способность её в среднем на 20%. Достигается это достаточно простым и эффективным способом: погружением ПВХ трубы на всю длину модели сваи;

- для достижения необходимой несущей способности модели сваи следует применять частичное погружение трубы, тем самым добиваясь различных вариантов «стесненной» дилатансии в несвязном грунте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д.Ю. Соболевский. – Минск: Наука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Проектирование забивных свай. Пособие к строительным нормам Республики Беларусь П4-2000 к СНБ 5.01.01-99.
3. Уласик, Т.М. Несущая способность свайных фундаментов с учетом скорректированного значения расчетного сопротивления на боковой поверхности / Т.М. Уласик // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 82–86.
4. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний: ГОСТ 20522-96.
5. Уласик, Т.М. Прочностные характеристики неоднородного песчаного грунта / Т.М. Уласик // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы VI Междунар. науч.-метод. семинара, Минск, 17–20 окт. 2000 г. / БГПА; редкол.: Н.П. Блещик [и др.]. – Минск, 2000. – С. 470–473.

Поступила 23.11.2015

#### THE INFLUENCE OF “CONSTRAINED” DILATANCY ON THE BEARING CAPACITY OF PILES FOUNDATIONS

T. ULASIK

*Dilatancy phenomenon manifested in incoherent soils, is an important factor in increasing the bearing capacity of pile foundations. To contact friction of pile foundations are formed on the side surface, is to mobilize the strength of cohesive soil. Thus not only mobilized mineral friction in the ground, but the friction engagement. The difference in the values of the bearing capacity of driven piles and piles of shells as defined without considering dilatancy and it proves the importance of the phenomenon of dilatancy in geotechnical practice. To investigate the influence of the “constrained” dilatancy on the bearing capacity of driven piles, as well as to explore the changed conditions “constrained” dilatancy conducted special laboratory tests to simulate the operation of the sand piles in the sand middle. These tests showed that simple changes hesitate cohesive soil conditions lead to an increase in the bearing capacity of pile.*

УДК 624.13.539.3

## ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УСТРОЙСТВА ЦЕМЕНТО-ГРУНТОВЫХ И МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСТРАИВАЕМЫХ В ГРУНТЕ

канд. техн. наук, доц. **А.П. КРЕМНЁВ; А.Н. ПОЛЯКОВ; К.С. ГУСЕНОК; Т.А. МИРЗАЕВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматривается неразрушающий метод контроля качества изготовления различного рода подземных конструкций, элементов фундаментов и грунтовых сооружений с использованием георадара. Приводятся примеры успешного применения георадарного зондирования для обнаружения пустот, каверн, слабых прослоек в цементно-грунтовых конструкциях, выполненных при помощи струйной технологии, а также при изготовлении буронабивных свай. Затронуты вопросы оптимизации применения традиционных разрушающих методов исследования с учётом данных георадиолокационного зондирования на примере противофильтрационной стенки строящейся Витебской ГЭС.*

**Введение.** Внедрение в практику строительства новых современных технологий возведения фундаментов и различного рода подземных конструкций позволяет существенно сократить сроки строительства и его стоимость. Так, к примеру, применение струйной технологии (Jet Grouting) при устройстве цементно-грунтовых опор и противофильтрационных завес позволяет в разы сократить время их возведения и, соответственно, снизить стоимость работ нулевого цикла. То же самое касается и буросмесительных методов устройства цементногрунтовых свай и опор, когда цементный раствор, смешиваясь с природным грунтом, после схватывания образует прочные и жесткие подземные конструкции.

Особое внимание в этом случае уделяется контролю качества выполняемых работ. Смешение цемента с грунтом происходит непосредственно в выработке, и проконтролировать этот процесс визуально не представляется возможным. При контрольном вскрытии нередко можно обнаружить каверны, пустоты, слабые прослойки, не заполненные цементным раствором, что отражается на несущей способности конструкций, долговечности и эксплуатационной пригодности.

На наш взгляд, наиболее перспективным методом оценки технического состояния подземных конструкций, устраиваемых непосредственно в грунте, является метод георадиолокационного зондирования, основанный на изучении отраженной электромагнитной радиоволны, излучаемой специальным передатчиком. Данный метод позволяет получить наибольшее количество информации о состоянии и строении подземных конструкций, уточнить геометрические параметры и обнаружить в них неоднородности. Георадарное зондирование предоставляет возможность наблюдать непрерывную целостную картину строения как оснований, так и возводимых конструкций в плане и по глубине [1–3]. При необходимости может быть построена трехмерная модель сооружения.

Важный вопрос при проведении обследования конструкций, совмещённых с грунтовой средой, при помощи георадара – подбор параметров зондирования, к которым относятся рабочая частота и тип антенного блока. Осложняющими факторами при выполнении георадарного зондирования на площадках возведения ответственных сооружений, в частности таких, как строящаяся Витебская ГЭС, являются стеснённые условия и возникающие помехи. Появление помех связано с наличием вблизи исследуемых конструкций арматуры, металлической опалубки, строительной техники, то есть всего того, что связано с выполняющимися непрерывно общестроительными работами.

### **Контроль качества цементно-грунтовой (грунтобетонной) противофильтрационной завесы Витебской ГЭС, выполненной с применением струйной технологии**

Витебская ГЭС – строящаяся гидроэлектростанция на реке Западная Двина вблизи города Витебска. После завершения строительства эта ГЭС будет крупнейшей в Беларуси.

Витебская ГЭС представляет собой типичную русловую низконапорную гидроэлектростанцию, включающую в себя бетонную водосбросную плотину, грунтовую плотину, здание ГЭС, однокамерный однониточный судовой шлюз, распределительное устройство. Проектная мощность строящейся Витебской ГЭС – 40 МВт, среднегодовая выработка – 38 млн. кВт·ч. В здании ГЭС должны быть установлены четыре горизонтальных капсульных гидроагрегата (диаметр рабочего колеса 3,95 м), мощностью по 10 МВт каждый. Подпорные сооружения ГЭС образуют водохранилище площадью 8,82 км<sup>2</sup> и объёмом 4,1 млн. м<sup>3</sup>, максимальной шириной 420 и максимальной глубиной 14 м.

Согласно проекту наряду с возведением основных сооружений ГЭС необходимо устройство так называемых конструкций, совмещённых с грунтовой средой – противофильтрационных стенок из цементно-грунта. На ГЭС противофильтрационные стенки выполнены по струйной технологии, сущность которой заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и

одновременного перемешивании грунта с цементным раствором в режиме «mix-in-place» (перемешивание на месте). После твердения раствора образуется новый материал – грунтобетон (цементогрунт), обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками [4]. Согласно проекту высота стенок на Витебской ГЭС составляет 10...12,5 м.

В данной исследовательской работе ставилась **задача** оценить применимость георадиолокации как составной части комплексной методики определения технического состояния и контроля качества выполнения работ по устройству заглубленной противофильтрационной стенки. На первом этапе планировалось выполнить зондирование по верху стенки для поиска возможных скрытых дефектов (сквозных отверстий, пропущенных участков природного грунта в толще стены, выделение участков с отличной от остальной стены волновой картиной). Необходимо было также оценить пригодность для этого антенн различного типа и частотного диапазона, подобрать оптимальные параметры зондирования. На втором этапе планировалось отобрать пробы (керны) из тела стенки в наиболее интересных с точки зрения интерпретации результатов георадарного зондирования местах.

Обследование технического состояния велось по комплексной методике, включающей метод неразрушающего контроля (георадиолокацию) и традиционный прямой метод исследования – отбор кернов из тела противофильтрационной стенки в отдельных точках.

**Георадиолокационное зондирование.** Георадиолокационное зондирование нашло широкое применение в различных областях науки и техники, связанных с изучением верхних слоев литосферы. Области применения георадара и основные принципы его работы достаточно подробно освещены в технической литературе [5; 6].

При исследовании сплошности подземных конструкций основное внимание уделялось обнаружению границ раздела между средами с различными значениями диэлектрической проницаемости (участками грунтоцемента различной плотности, материалом стены и пустотами, стеной и грунтами природного сложения и т.д.). Учитывая, что при распространении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона граница сред с различными электрофизическими свойствами служит своего рода отражающей поверхностью, что фиксируется приёмником устройства в виде всплеска амплитуды возвращенного сигнала, можно сделать вывод: чем больше разница в электрофизических характеристиках, тем лучше отображается граница раздела между ними.

Результаты георадарного зондирования записываются в виде профилей, состоящих из совокупности отдельных трасс. Трасса – один акт посылки-приёма зондирующего сигнала (физическое измерение). На профиле границы раздела сред отображаются почти в том виде, в каком они есть на самом деле [7].

Важнейшим фактором, влияющим на получение максимально информативного профиля, являются параметры зондирования. К таким параметрам относятся рабочая частота, тип антенного блока, временной интервал зондирования (глубинность исследования), шаг трасс в профиле и т.д.

Низкочастотные антенны (с рабочей частотой до 100 МГц) позволяют получать информацию с больших глубин, но имеют довольно низкую разрешающую способность (порядка метра для антенн с частотой 25 МГц и от 0,5 до 0,1 м для антенн с частотой 100 МГц), что связано с большой длиной волны зондирующего сигнала. Глубинность исследования при этом достигает 25...35 м. В то же время со снижением частоты увеличивается зона начальной нечувствительности (так называемая мертвая зона) георадара. При повышении частоты зондирования разрешающая способность возрастает (4...10 см для антенн с частотой 500 МГц), но при этом увеличивается затухание электромагнитной волны в среде, а значит и уменьшается глубина зондирования до 3...6 м.

Антенны могут быть экранированными и неэкранированными. Неэкранированные предназначены для работы на больших глубинах, их конструкция позволяет разнести приёмник и передатчик при работе методом общей глубинной точки для получения электрофизических характеристик исследуемых сред, но очень чувствительны к помехам. В конструкции экранированных антенн для минимизации помех применён поглощающий экран, что позволяет работать в условиях городской застройки.

Так как на начальном этапе скорость распространения сигнала в исследуемой среде неизвестна, запись результатов зондирования ведётся в глубинном формате, то есть фиксируется амплитуда отражённого сигнала и время его двойного пробега. Глубинность исследования зависит от предполагаемого времени ожидания отклика зондирующего сигнала от нижней границы исследуемого объекта, так что временной интервал записи (развертка) превышает двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований. Основанием для выбора интервала записи служат сведения о глубинах и предполагаемые значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде.

Так как предполагалось исследование конструкции со значительной глубиной залегания нижнего края (около 12 м), были выбраны три антенных блока с различающимися характеристиками – неэкранированный с частотой 100 МГц и экранированные с частотами 100 и 250 МГц. Каждая из этих антенн имеет схожие сферы применения.

Неэкранированная антенна с рабочей частотой 100 МГц – универсальная антенна с хорошей глубиной зондирования и достаточной разрешающей способностью. Сферы применения очень обширны – ис-

пользуется для исследования заглубленных объектов, инженерной геологии, картирования дна рек и водоемов, обнаружения захоронений отходов, карстовых полостей и глубоко заложённых трубопроводов и т.д.

Экранированная антенна с рабочей частотой 250 МГц – универсальная, со средней глубинностью и средней разрешающей способностью. Обычно используется для обследования подземных конструкций, обнаружения коммуникаций, подземных резервуаров и пустот и т.д.

Экранированная антенна с рабочей частотой 100 МГц – самая низкочастотная серийно выпускаемая экранированная антенна. Обладает средней разрешающей способностью. Подходит для решения широкого спектра инженерных, инженерно-геологических, гидрогеологических и других задач.

Полученные георадаром профили были обработаны на компьютере с помощью программы RadExplorer разработанной «ДЕКО-Геофизика». Эта программа позволила обработать полученные данные и с помощью различных встроенных инструментов получить качественную картину строения стенки как в плане, так и по глубине.

Интерпретация результатов георадарного зондирования проводилась в четыре этапа. На первом этапе устанавливалось, все ли выделяемые оси синфазности отраженных волн на радарограммах являются полезными отражениями, связанными с реальными отражающими границами в разрезе. На втором проводилось выделение основных элементов разреза, которые получили название георадарных комплексов. Третий этап заключался в детальном анализе волновой картины внутри выделенных георадарных комплексов, то есть выделялись и анализировались так называемые георадарные фации. На заключительном, четвертом, этапе производилось построение глубинного разреза, на котором отображены особенности строения исследуемой противofильтрационной стены.

**Результаты георадиолокационного зондирования.** Исследуемая стенка располагалась в котловане строящейся Витебской ГЭС (рис. 1). На момент проведения работ были частично возведены бетонные стенки отдельных блоков ГЭС.

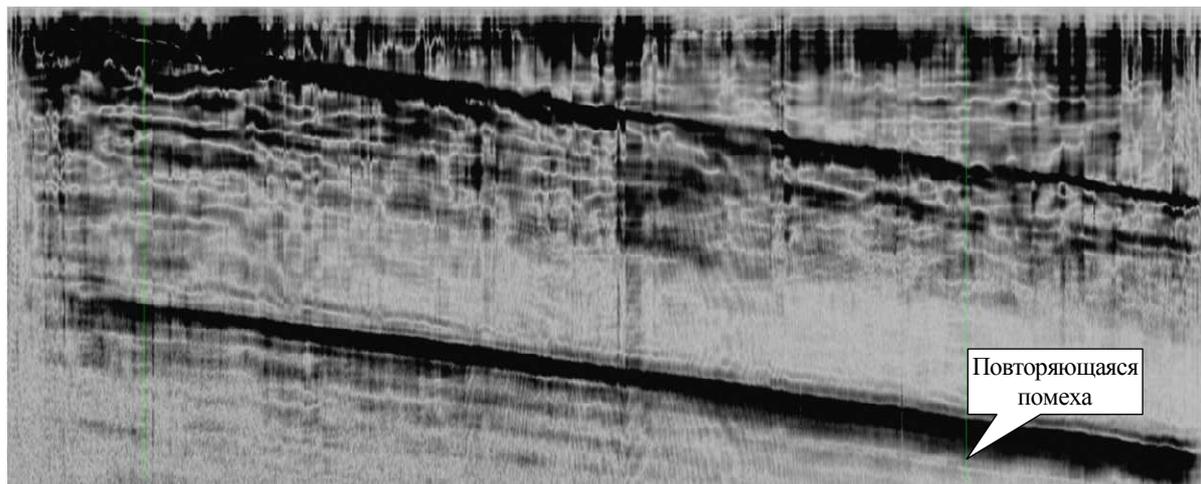


Рисунок 1 – Противofильтрационная стенка и прилегающая территория

Проведение работ осложнялось тем, что для выполнения зондирования антенна должна была перемещаться по верху стенки. Так как верхний край стенки неровный, для антенн были устроены деревянные подмости (см. рис. 1). Кроме того, вдоль направления профиля располагался откос, который был источником постоянной помехи, хорошо видной на всех профилях. Источниками помех являлись также металло-

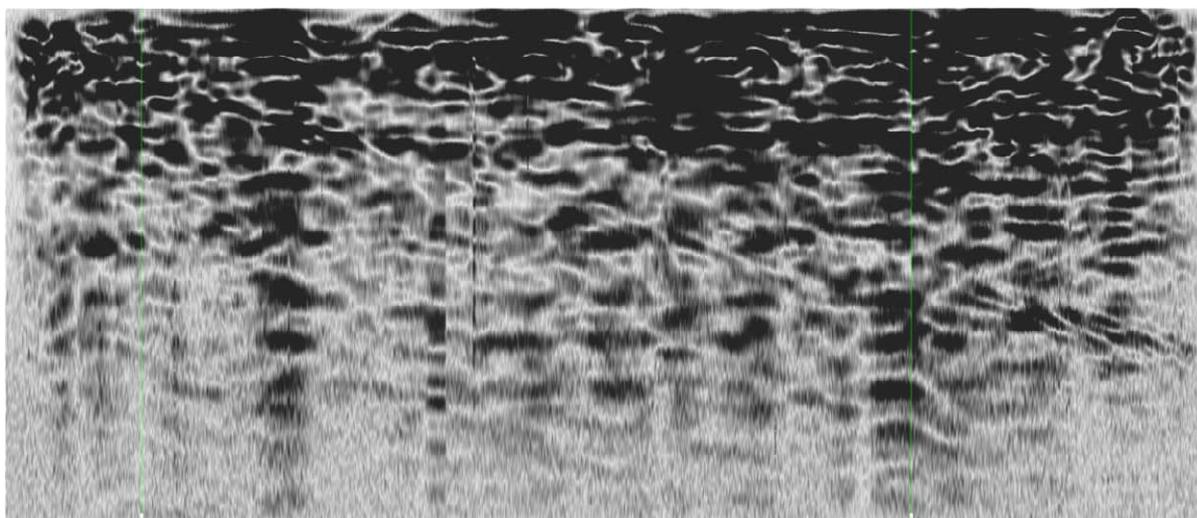
конструкции опалубки, арматурные каркасы вблизи стенки и участки уже возведённых железобетонных стен. Первой использовалась незранированная антенна с частотой 100 МГц. Но именно чувствительность этой антенны к внешним помехам не позволила получить качественный профиль.

На рисунке 2 показан профиль после обработки. Мощные сигналы помех от откосов котлована отобразились повторяющимися параллельными наклонными полосами чёрного цвета, и из-за их мощности объём полезной информации на профиле мал. Удалось выделить только отдельные скважины, показанные на профиле вертикальными полосами.



**Рисунок 2 – Профиль незранированной антенны с частотой 100 МГц**

Экранированная антенна с частотой 250 МГц показала себя лучше, на профиле уже можно выделить отдельные зоны с одинаковой волновой картиной, отображающей распределение участков с аналогичными характеристиками (рис. 3).



**Рисунок 3 – Профиль экранированной антенны с частотой 250 МГц**

Но самый информативный профиль получен с помощью экранированной антенны 100 МГц. На профиле после обработки на некоторых участках чётко видны отдельные скважины, сделанные при устройстве стены (рис. 4). Также уверенно можно выделить в теле стенки зоны, волновая картина которых отличается от общей. Эти зоны показаны на профиле в виде областей сплошной чёрной заливки или с чередованием контрастных чёрных и серых линий. При обработке данных зондирования в программе RadExplorer выявлено, что сигнал в таких областях слабо затухал с глубиной.

По результатам зондирования установлено, что скважины при устройстве противодиффузионной стены выполнялись с шагом 200 мм (отдельные скважины видны по всему профилю, полученному для экранированной антенны с рабочей частотой 100 МГц).

Анализ волновой картины показал, что структура стены в целом однородна. Существенных неоднородностей, полостей значительных размеров не обнаружено. На профиле отмечены аномальные области со сплошным чёрным фоном с редкими горизонтальными серыми полосами (либо без них), сигнал в которых практически не затухает.

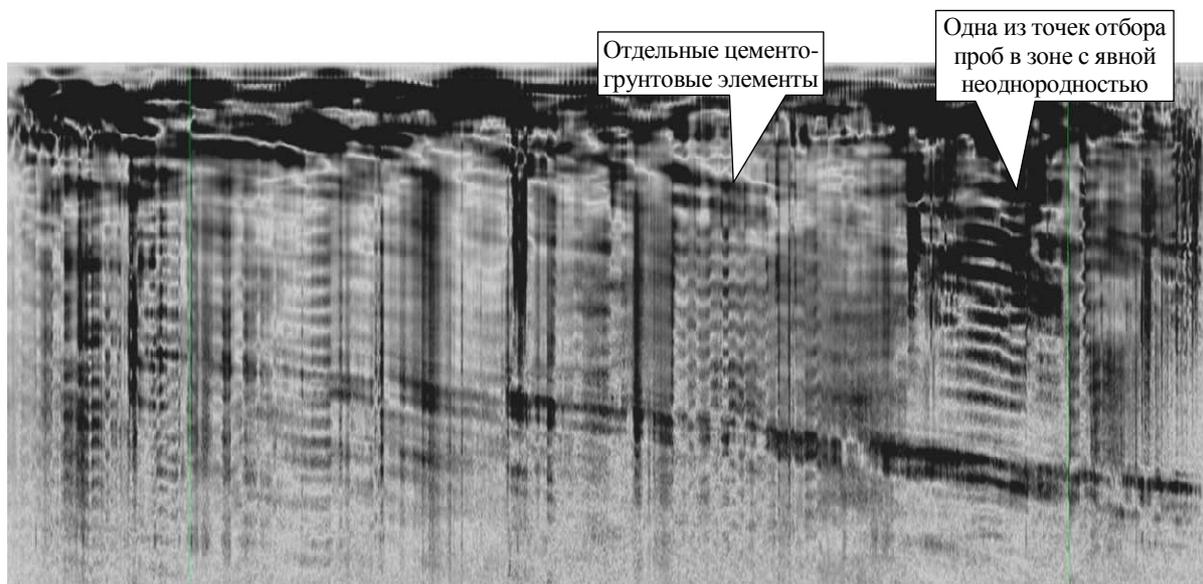


Рисунок 4 – Георадарный профиль экранированной антенны с частотой 100 МГц

Полученный георадарный профиль представляет собой реальную непрерывную картину строения противofiltrационной стенки как в плане, так и по глубине и комплексно отображает распределение зон с одинаковыми свойствами.

**Результаты второго этапа исследования.** На основе результатов анализа волновой картины были намечены места для отбора образцов с целью их дальнейшего визуального и лабораторного исследования в местах наиболее явных неоднородностей. После отбора кернов из тела стенки в местах с наиболее интенсивной на профиле чёрной заливкой выяснилось, что материал стены состоит из однородного цементного камня практически без посторонних примесей (рис. 5).



Рисунок 5 – Керны, отобранные из тела стенки

Сравнение радарограмм с результатами инженерно-геологических изысканий показало, что в местах с тёмной заливкой на профиле стенка проходит через песчаные грунты.

По результатам исследований можно сделать следующие **выводы**:

- георадарное зондирование применимо в качестве метода оперативного контроля качества выполненных работ при устройстве монолитных и цементогрунтовых подземных конструкций;
- наиболее информативный профиль с достаточной для данных целей разрешающей способностью и глубиной исследования получен при применении экранированной антенны с рабочей частотой 100 МГц;
- применение неэкранированных антенных блоков при проведении исследований на строительной площадке нецелесообразно из-за сильных помех, которые вносят существенные искажения в принимаемый сигнал;
- анализ волновой картины показывает, что структура противодиффузионной стены в целом однородна. Существенных неоднородностей, полостей значительных размеров не обнаружено;
- полученный георадарный профиль представляет собой реальную непрерывную картину строения противодиффузионной стенки как в плане, так и по глубине и комплексно отображает распределение зон с одинаковыми свойствами;
- результаты георадарного зондирования позволили существенно сократить количество точек отбора кернов для визуального и лабораторного исследования. Отбор кернов производился лишь в точках с наибольшей концентрацией неоднородностей строения, что позволило более оперативно и с меньшими затратами оценить техническое состояние подземной конструкции.

Таким образом, георадиолокация – это метод, который при небольших затратах труда и времени позволяет оперативно оценить состояние и сплошность конструкций, качество выполняемых работ, строение основания т.д. Применение георадарного метода для решения различных инженерных задач в настоящее время приобретает все более широкие масштабы. Это объясняется простотой и удобством проведения полевых работ и высокой производительностью метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изюмов, С.В. Теория и методы георадиолокации: учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2008. – 196 с.
2. Кремнёв, А.П. Георадарное зондирование при обследовании грунтовых насыпей / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVIII междунар. науч.-метод. семинара: в 2-х т. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. II. – С. 260–265.
3. Кремнёв, А.П. Практическое применение георадарного зондирования в инженерно-геологической практике / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Геотехника Беларуси: наука и практика: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. – Минск: БНТУ, 2013. – Т. I. – С. 129–134.
4. Малинин, А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 168 с.
5. Владов, М.Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 90 с.
6. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
7. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие / А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.

Поступила 03.11.2015

#### **GPR QUALITY CONTROL METHODS FOR THE CEMENT-SOIL AND CAST IN SITE UNDERGROUND STRUCTURES**

**A. KREMNIU, A. PALIAKOU, K. HUSIANOK, T. MIRZAYEU**

*This article describes the non-destructive GPR quality control method of a various types of underground structures and foundation elements. The article describes an examples of the successful GPR application to detect voids, cavities, weak layers in the cement-ground structures made using jet-grouted technology, as well as in the manufacture of bored piles. On an example of Vitebsk hydroelectric station watertight wall in touched upon issues of optimizing use of traditional destructive methods of control based on the GPR data.*

УДК 624.138.26

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ГРУНТОБЕТОННЫМИ МИКРОСВЯЯМИ И АПРОБАЦИЯ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

канд. техн. наук, доц. **В.Н. КРАВЦОВ**; **С.А. ЯКУНЕНКО**; **П.В. ЛАПАТИН**  
(Институт БелНИИС, Минск)

*Представлены итоговые результаты исследований и практического применения метода вертикального армирования для упрочнения оснований плитных фундаментов пониженной прочности. Установлены оптимальный процент армирования малопрочных грунтов, конструктивные характеристики геомассивов (шаг, диаметр армоэлементов); разработаны принципы их расчета. На примере конкретного объекта показано, что разработанные РУП «Институт БелНИИС» технологические схемы устройства геомассивов позволяют снизить деформативность слабых оснований в 2...3 раза и более.*

**Введение.** В настоящее время в практике фундаментостроения Республики Беларусь широкое распространение получила технология упрочнения грунтовых оснований пониженной прочности способом вертикального армирования грунта (ВА) с последующим устройством на них плитных фундаментов меньших размеров. Технология ВА значительно экономичнее виброударных технологий упрочнения грунта (трамбовка, виброукатка), а плитные фундаменты на вертикально армированных основаниях экономичнее фундаментов глубокого заложения [1–3]. Метод вертикального армирования грунта позволяет достаточно просто упрочнять основания плитных фундаментов до наперед заданных требуемых свойств грунтов ( $E$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ) с использованием недорогих местных материалов (щебень, крупный песок, грунтобетон), укладываемых в предварительно разбуриваемые, раскатываемые или проколотые скважины, в том числе в условиях стесненной городской застройки, не оказывая на нее динамических воздействий. Между тем до настоящего времени отсутствуют достоверные методы расчета и конструирования вертикально армированных оснований, учитывающих все особенности их изготовления и работы (шаг, диаметр армоэлементов, степень упрочнения и др.), что приводит к завышению стоимости геомассивов. Исходя из этого в РУП «Институт БелНИИС» выполнены исследования по изучению особенностей упрочнения малопрочных грунтов усовершенствованным в РУП «Институт БелНИИС» методом их вертикального армирования набивными и забивными сваями уплотнения [4]. Целью данных исследований явилась разработка эффективных технологий устройства ВА, методов их расчета и конструирования, обеспечивающих по сравнению с традиционными методами упрочнения грунта (укатка, трамбовка, в том числе армирование грунта) снижение себестоимости до 30%.

**Методика исследований и их результаты.** Исследования выполнены в лабораторных и натуральных условиях с использованием стандартных методов испытания грунта для определения его характеристик ( $E$ ,  $\varphi$ ,  $c$ ) до и после его армирования. Оценка прочностных и деформационных характеристик армированных грунтов с различным процентным соотношением армоэлементов в их объеме выполнена посредством анализа результатов серии лабораторных компрессионных и сдвиговых испытаний.

В процессе планирования эксперимента [5 и др.] определены основные факторы, влияющие на прочностные и деформативные свойства грунта, проведен анализ полученных результатов с использованием методов математической статистики и программного комплекса STATISTIKA 10.0.

Первый этап исследований выполнен на образцах предварительно высушенного однородного песчаного (глинистого) грунта, результаты которых принимались за контрольные.

На втором этапе образцы формировались из смеси с заданным массовым содержанием и свойствами исходного грунта и армоэлементов (включений) с процентным соотношением грунт : крупные включения (армоэлементы), равным 90 : 10, 70 : 30 и 50 : 50 (рис. 1).

Для сопоставимости результатов испытаний образцы грунта однородного состава и с крупными включениями (армоэлементами) формировались по следующей схеме. Согласно матрице плана эксперимента готовилась серия образцов исследуемого грунта (песок глинистый) объемом  $V = A \cdot h$  (где  $A$  – площадь образца,  $\text{см}^2$ ;  $h$  – высота,  $\text{см}$ ) с заданными исходными характеристиками (плотностью  $\rho_0$ , влажностью  $\omega_0$ , модулем деформации  $E_0$ ), которые испытывались на сдвиг и сжатие. Следующие серии образцов готовились из исследуемого грунта с характеристиками, аналогичными контрольным образцам, но с различным процентом содержания в них армоэлементов (от 5 до 50% по массе). Эквивалентная плотность таких образцов устанавливалась из условия:

$$(V - nV_{ap})\rho_0 + nV_{ap}\rho_{ap} = \rho_{экс}V, \quad (1)$$

где  $n$  – количество армирующих включений, шт.;  $V_{ap}$  и  $\rho_{ap}$  – объем и плотность,  $\text{г}/\text{см}^3$ , армирующих включений;  $\rho_{экс}$  – эквивалентная плотность армированного грунта,  $\text{г}/\text{см}^3$ .



Рисунок 1 – Общий вид образцов из мелкого песка для сдвиговых испытаний с разным процентом армирования от 10 до 30%

Выразив в формуле (1) объемы  $V$  и  $V_{ap}$  через их площадь и высоту и разделив все слагаемые на высоту образца  $h$ , получаем выражение:

$$h(A - nV_{ap})\rho_0 + nA_{ap}h\rho_{ap} = \rho_{эке}Ah, \quad (2)$$

из которого определяем требуемую эквивалентную плотность, необходимую для формирования образцов и конструирования геомассивов:

$$\rho_{эке} = \frac{(A - nV_{ap})\rho_0 + nA_{ap}\rho_{ap}}{A}. \quad (3)$$

Аналогичным аналитическим методом получено также решение для эквивалентного модуля деформации грунта  $E_{эке}$ :

$$E_{эке} = kE_{ap} \left( 1 + \frac{E_0 A}{kE_{ap} A_{ap}} \right) \frac{A_{ap}}{A}, \quad (4)$$

где  $E_{ap}$ ,  $E_0$  – модуль упругости армоэлемента и модуль деформации грунта, МПа;  $k$  – коэффициент, учитывающий изменчивость свойств материала.

Сформированные таким образом смеси подвергались сдвиговым и компрессионным испытаниям по стандартной методике ГОСТ 12248 [6], физические характеристики армоэлементов определялись по ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.

По результатам этих испытаний получены компрессионный и общий модули деформации  $E_{эке}$  в диапазоне давлений от 0 до 600 кПа и значения угла внутреннего трения  $\phi$  (рис. 2 и 3).

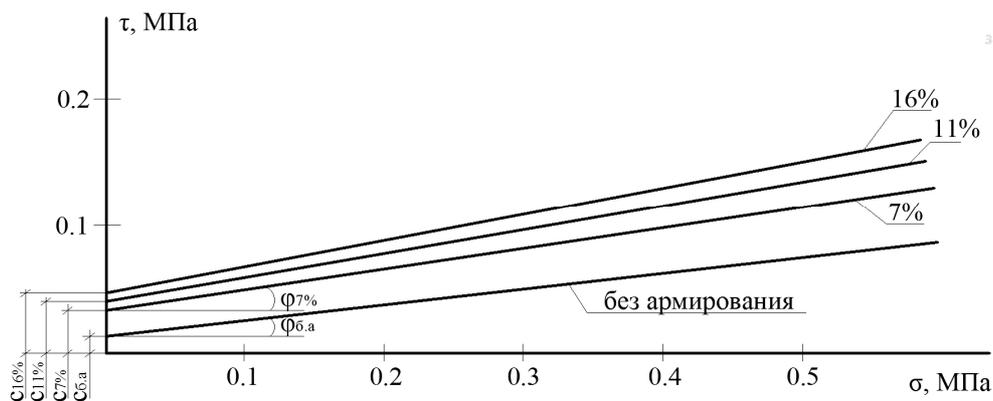
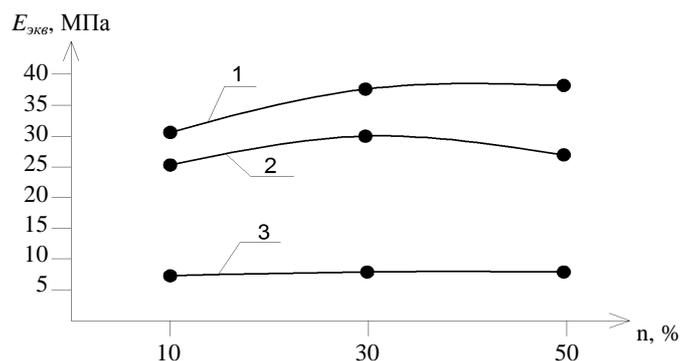


Рисунок 2 – Характерные зависимости изменения угла внутреннего трения ( $\phi$ ) для образцов песка мелкого с различным процентом армирования

Для оценки достоверности опытных данных, установленных по результатам испытаний, значения  $E$  и  $\phi$  сравнивались с их деформационными и прочностными характеристиками, полученными методом конечно-элементного моделирования.



1 – для диапазона нормального напряжения  $\sigma$  от 400 до 600 кПа;  
2 – то же, от 200 до 400 кПа; 3 – то же, от 0 до 200 кПа

Рисунок 3 – Характерные зависимости модуля деформации от процентного содержания крупных включений (армоэлементов) для песка

После определения оптимального процента армирования исследуемых грунтов выполнялись маломасштабные модельные лотковые испытания вертикально армированных оснований. Методика и результаты лотковых испытаний отражены в литературе [2; 9 и др.].

Результаты лабораторных исследований свойств упрочненного армоэлементами грунта и лотковых испытаний маломасштабных моделей геомассивов показали следующее:

а) геомассив ВА работает не как свайное, а упрочненное армоэлементами (уплотненное) грунтовое основание с эквивалентными характеристиками ( $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $E_s$ ), не менее чем в 2...3 раза превышающими их значения в неармированном грунте, и обладает по отношению к природному грунту ярко выраженной прочностной и деформационной анизотропией и наличием арочного эффекта;

б) разрушение геомассива ВА от предельной нагрузки происходит по следующим схемам:

- от выпора из под фундамента грунта буферной подушки, если ее мощность больше предельной толщины ( $h_{ub} > 0,75b$ , где  $b$  – ширина фундамента, или  $E \leq 20$  МПа);
- от проскальзывания (задавливания) армоэлементов относительно естественного грунта при нагрузках на основание больше критических ( $p_0 \geq 0,8R$ ) или при отсутствии буферного слоя;
- от потери устойчивости геомассива по явно выраженным условно прямолинейным поверхностям скольжения.

Таким образом, для оценки степени устойчивости и исследования условий возникновения сдвигов в основании плитного фундамента вполне очевидна возможность применения общей теории механики грунтов, в частности равновесия горных пород, рассмотренных в работах К. Терцаги, Б.В. Бахолдина, В.Г. Березанцева, В.А. Флорина и других:

- эквивалентные модули деформации  $E_s$  и сцепления  $c_s$  с ростом процента армирования грунта до 30% увеличиваются в несколько раз, при незначительном изменении угла внутреннего трения  $\phi$ , после чего дальнейшее увеличение процента армирования практически не приводит к увеличению прочности грунта;

- в пределах армированного сваями массива грунта до критической нагрузки происходят преимущественно вертикальные деформации уплотнения.

Для проверки результатов лабораторных исследований, а также разработанного оборудования и различных способов устройства ВА выполнен комплекс экспериментальных натурных (полевых) исследований геомассивов на 9 опытных площадках.

Натурные испытания геомассива на опытных площадках проводились как до, так и после упрочнения грунта сваями уплотнения с определением его характеристик лабораторными и полевыми стандартными методами. В полевых условиях геомассивы испытывались динамическим, статическим зондированием по ГОСТ 19912-2001 [7] и штампом по ГОСТ 20276-99 [8].

Были испытаны геомассивы из песчаных и глинистых грунтов, упрочненных по технологии ВА, где в качестве армоэлементов применялись мелкозаглубленные набивные грунтобетонные сваи (в буровых, бурораздвижных, проколотых и выштампованных скважинах) диаметром 100...200 мм, длиной 1,5...3 м и готовые забивные микросваи с размерами сторон квадратного поперечного сечения 150...200 мм, длиной 1,5...5,0 м. Основные результаты полевых исследований отражены в работах авторов [1; 2; 9 и др.].

Результаты полевых натурных испытаний подтвердили данные, полученные в лабораторных условиях, и эффективность заявленного решения по упрочнению оснований плитных фундаментов методом вертикального армирования сваями уплотнения и послужили исходным материалом для разработки метода их расчета и рекомендаций по проектированию (расчету) и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) плитных фундаментов [10]. Ниже представлен пример апробации результатов исследований и разработанных рекомендаций на одном из объектов.

**Апробация результатов исследований в производственных условиях.** Практическое применение результатов исследований нашло отражение в разработке методов расчета ВА, рекомендаций по их проектированию и устройству и во внедрении на строительных объектах Республики Беларусь [1; 2; 9–11 и др.].

Ниже описаны результаты апробации предложенных методов проектирования и возведения оснований и фундаментов административно-бытового корпуса (АБК) на объекте «Реконструкция АЗС под производственную базу ООО «Геоплюс» в агрогородке «Колодищи» Минского района».

**Исходные данные и характеристика геомассива фундамента по методу вертикального армирования.** Здание объекта крупноблочной системы одноэтажное со стенами из керамзитобетонных блоков с перспективой надстройки 2-х дополнительных этажей, фундаменты ленточные из стандартных бетонных блоков шириной 400 мм, распределенная нагрузка от 1-го этажа на основание фундамента составляет 0,158 МПа.

Анализ строительной площадки объекта (рис. 4, табл. 1) показал, что она относительно благоприятная для возведения плитных ленточных фундаментов. Осложняющим фактором является наличие в активной зоне фундаментов насыпного неоднородно сжимаемого по глубине и простираению насыпного грунта с включениями строительного мусора и растительных остатков. Это обусловило необходимость разработки проекта и технологии упрочнения верхней зоны их основания.

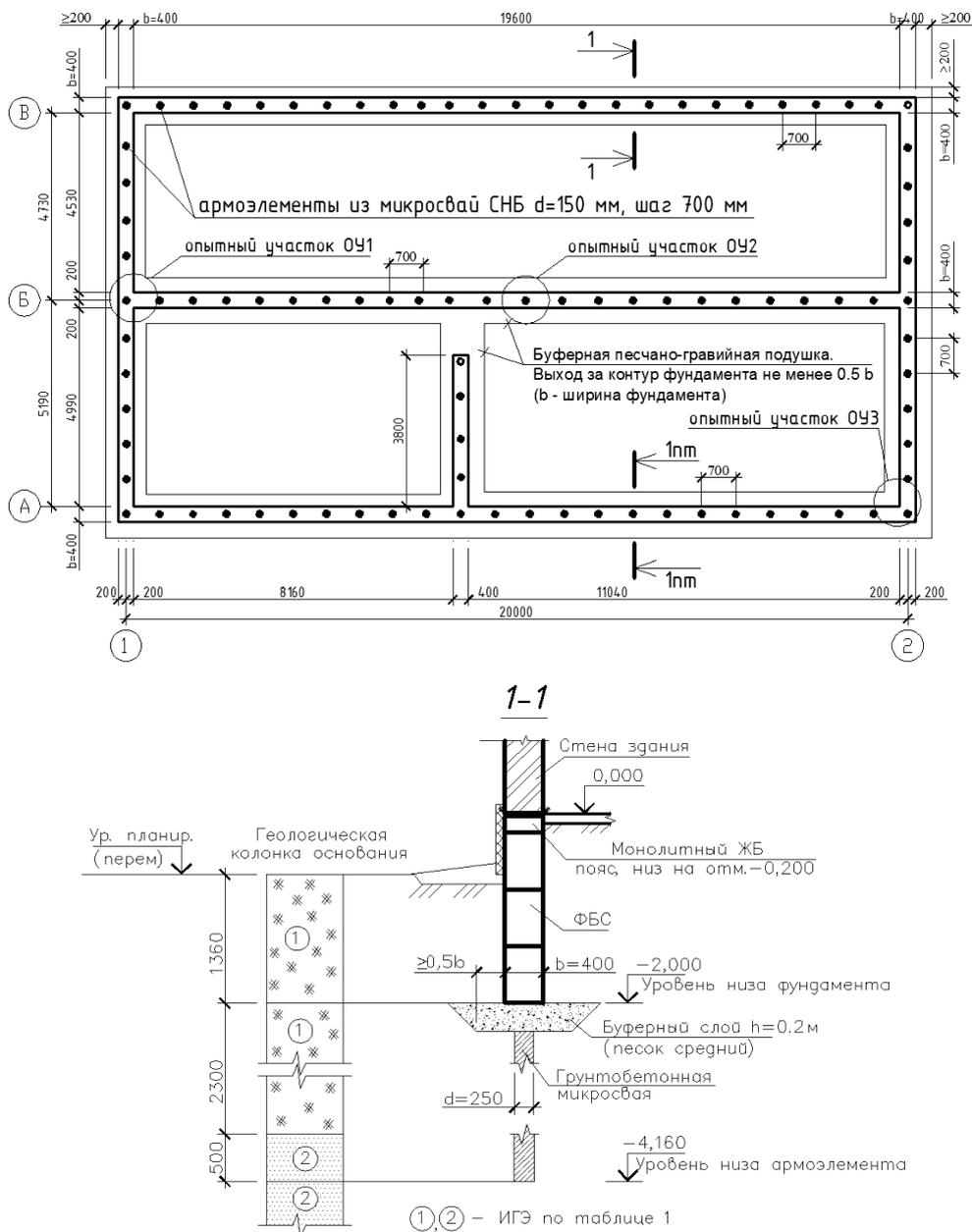


Рисунок 4 – Схема-план фундаментов и геомассива здания (с расположением армоэлементов)

Таблица 1 – Состав основания фундаментов объекта сверху вниз и физико-механические характеристики его грунтов

№ ИГЭ	Вид грунта	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	Удельное сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	Модуль деформации, МПа
		$\gamma_{II}$	$c_{II}$	$\varphi_{II}$	$E$
Техногенные отложения (t IV)					
1	Насыпной грунт мощностью до 3,5 м	16,4	–	–	11
Конечно-моренные отложения (gt II sz)					
2	Песок средний средней прочности	17,3	0,001	36	34
3	Песок крупный средней прочности	16,9	0,000	36	23

Геомассив запроектирован только в пределах расположения ленточных фундаментов согласно разработанным рекомендациям [10]. В качестве армозащитных элементов, исходя из возможностей местной строительной организации, приняты набивные грунтобетонные сваи в бурораздвижных скважинах без выемки грунта (рис. 5). Проходка скважин производилась металлическим лидером  $\varnothing 250$  мм, изготовленным по чертежам РУП «Институт «БелНИИС»», который устанавливался вместо бурового шнека на буровой установке УГБ-1ВС (без дополнительной переделки узла сопряжения). Скважины заполнялись грунтобетоном по [11] с соотношением смеси местный грунт : цемент М150, равным 5 : 1.



Рисунок 5 – Процесс изготовления армозащитных элементов на строительной площадке здания

Требуемая эквивалентная плотность геомассива, толщина прослойки и шаг армозащитных элементов рассчитаны согласно рекомендациям [10]:

- требуемый минимальный эквивалентный модуль деформации  $E_{экв. min}$  при давлении на основании  $p_{max} = 0,158$  МПа и глубине сжимаемой зоны  $H_c$ :

$$H_c = \beta \frac{p_{max}}{\gamma_0} = 1 \cdot \frac{0,158}{0,0164} = 9,63 \text{ (м)};$$

$$E_{экв} = \beta \frac{p_{max} H_c}{s_u} = 1 \cdot \frac{0,158 \cdot 9,63}{0,08} \approx 19 \text{ (МПа)};$$

- требуемый эквивалентный удельный вес  $\gamma_{\text{экв.расч}}$  армированного основания по (3), равен:

$$\gamma_{\text{экв.расч}} = \frac{(A - nA_a)\gamma_0 + nA_a\gamma_a}{A} = \frac{(1 - 2 \cdot 0,05) \cdot 16,4 + 2 \cdot 0,05 \cdot 23}{1} = 17,06 \text{ (кН/м}^3\text{)};$$

- требуемое количество  $n$  и максимальный шаг  $a_{\text{max}}$  армоэлементов на  $1 \text{ м}^2$  геомассива при требуемой эквивалентной пористости грунта  $e_{\text{экв.расч}}$ , принимаемой по графику компрессионных испытаний для  $E_{\text{экв.мин}} = 19 \text{ МПа}$ , но не менее

$$e_{\text{экв.расч}} = e_0 - m_v \cdot p_{\text{max}} = 0,7 - 1 \cdot 0,158 = 0,54,$$

равно

$$n = \frac{A \left( \frac{e_0 - e_{\text{экв.расч}}}{1 + e_0} \right)}{A_a} = \frac{1}{0,05} \left( \frac{0,7 - 0,54}{1 + 0,7} \right) \approx 2 \text{ (шт./м}^2\text{)},$$

$$a_{\text{max}} = d_a \sqrt{\frac{\pi\gamma_0}{3,5(\gamma_{\text{экв.расч}} - \gamma_0)}} = 0,25 \sqrt{\frac{3,14 \cdot 16,4}{3,5(17,06 - 16,4)}} = 1,17 \text{ (м)},$$

по конструктивным требованиям принимаем шаг  $a = 0,7 \text{ м}$ ;

- требуемая толщина песчаной прослойки на  $1 \text{ м}^2$  основания

$$h_{\text{тб.мин}} = \frac{s_u \cdot E_{\text{б.н}} \cdot \sum A_a}{p_{\text{max}}} = \frac{0,015 \cdot 20 \cdot 0,1}{0,158} \approx 20 \text{ (см)}.$$

**Исследование вертикально армированного основания фундаментов объекта.** Для оценки эффективности заложенных в проект решений по упрочнению основания фундаментов здания выполнены его испытания штампом площадью  $2500 \text{ см}^2$  по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 20276-99 [8]. Испытания проводились до и после устройства геомассива.

Нагружение осуществлялось гидравлическим домкратом грузоподъемностью  $500 \text{ кН}$ . Реактивные усилия воспринимались стальной балкой, закрепленной с помощью винтовых анкеров.

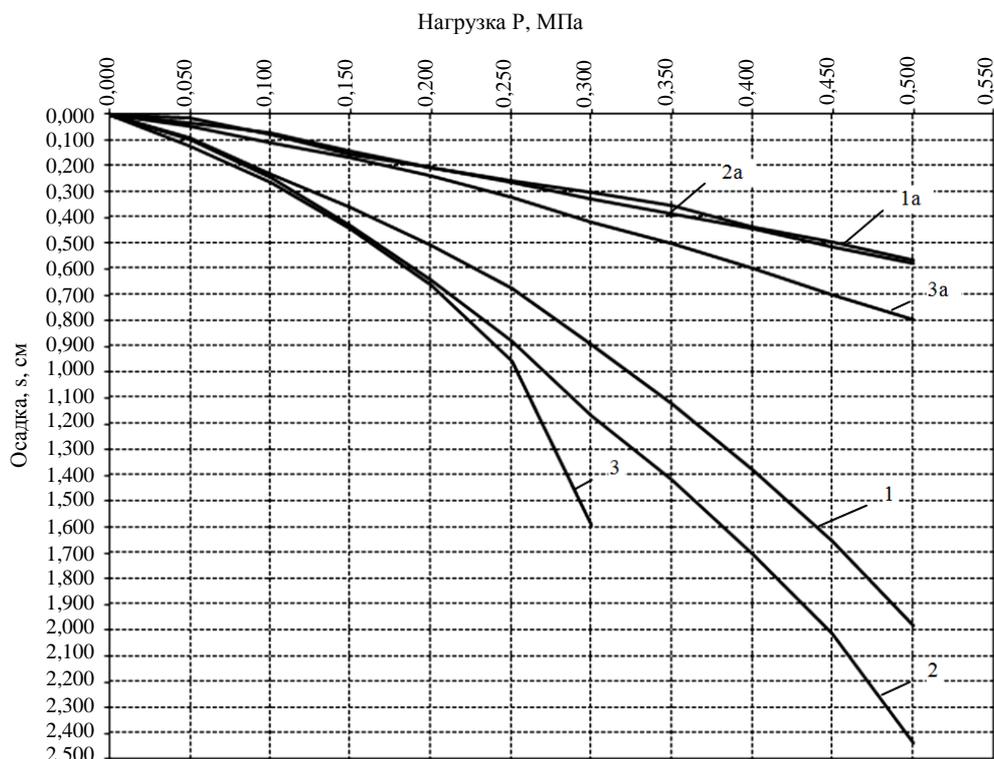
Результаты испытания штампом приведены в таблице 2 и на рисунке 6.

**Таблица 2 – Результаты испытания насыпного грунта и геомассива штампом**

Номер опытного участка по рисунку 4	Вид грунта	Площадь штампа $s$ , $\text{см}^2$	Расчетный интервал давлений $p_n \dots p_0$ , МПа	Осадка в расчетном интервале $s_n \dots s_0$ , см	Модуль деформации насыпного грунта до $E_0$ и после упрочнения по методике ВА $E_{\text{ва}}$ , МПа	$\frac{E_{\text{ва}}}{E_0}$
ОУ1	Насыпной грунт	2500	0,3...0,5	0,895...0,091	12,6	3
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,301...0,036	38,3	
ОУ2	Насыпной грунт	2500	0,3...0,5	1,166...0,095	9,5	3,4
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,330...0,017	32,4	
ОУ3	Насыпной грунт	2500	0,25...0,5	0,957...0,121	9,7	2,9
	Геомассив по методике ВА	2500	0,3...0,5	0,415...0,047	27,6	

Результаты полевых натуральных испытаний, запроектированных по рекомендациям [10] геомассива, подтверждают достоверность разработанного метода расчета и эффективность принятого решения по упрочнению оснований плитных ленточных фундаментов на объекте методом вертикального армирования грунтобетонными сваями уплотнения в пробитых скважинах. Среднее значение модуля деформатив-

ности насыпных грунтов после их упрочнения по методике ВА составляет  $E_{ва} = 33$  МПа, при исходном  $E_0 = 11$  МПа, то есть он увеличился в 3 раза.



графики 1, 2, 3 – до армирования; 1a, 2a, 3a – после армирования грунта

Рисунок 6 – Зависимость осадки штампа от нагрузки  $s = f(p)$  на опытных участках ОУ1, ОУ 2, ОУ3 строительной площадки согласно рисунку 4

Предел пропорциональности в зависимости «нагрузка – осадка»  $s = f(p)$  при нагрузке  $p = 0,5$  МПа не достигнут, то есть несущая способность геомассива составляет не менее 0,5 МПа, при исходной предельной нагрузке на основание от одноэтажного здания  $p_{np} = 0,16$  МПа, и в случае надстройки 2-х этажей  $p_{np} = 0,46 < 0,5$  МПа. При этом деформации упрочненного основания от проектных нагрузок по сравнению с неупрочненным насыпным грунтом уменьшаются в 4 раза.

**Закключение.** В результате проведенных исследований предложены и апробированы в производственных условиях конструкции и технология вертикального армирования грунтов сваями уплотнения. Достоверность и эффективность результатов исследований, разработанных методов расчета предложенных геомассивов подтверждены экспериментально.

Эффект от внедрения указанной технологии для объекта, где производилась ее производственная апробация, по сравнению с традиционным свайным способом возведения фундаментов с прорезкой малопрочного насыпного слоя составил 90%; по сравнению с вибродинамическими способами упрочнения грунтов – не менее 30%. Это достигнуто благодаря использованию более легкой и менее энергоемкой стандартной техники, имеющейся в строительных организациях Республики Беларусь, и снижению материалоемкости работ нулевого цикла за счет использования местного самого недорогого материала – грунта. При этом несущая способность оснований, подготовленных указанным способом, увеличилась в 3 раза, а их деформативность снизилась в 4 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сеськов, В.Е. Упрочнение оснований методом вертикального армирования грунтобетонными микросваями в пробитых скважинах / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов, С.А. Якуненко // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сб. тр. междунар. конф.; редкол.: Р.А. Мангушев (отв. ред.) [и др.]. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С. 295–300.

2. Кравцов, В.Н. Проектирование вертикально армированных оснований плитных фундаментов / В.Н. Кравцов // Геотехника Беларуси: Наука и практика: тр. междунар. конф. по геотехнике. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 9.
3. Мирсояпов, И.Т. Исследование прочности и деформируемости просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами / И.Т. Мирсояпов, В.Р. Мустакимов // Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика: тр. междунар. конф. по геотехнике Т. 2. – СПб.: ПГУПС, 2005. – С. 40–45.
4. Фундамент здания, возведенный на искусственно упрочненном слабом или малопрочном грунте, и способ его возведения: пат. 18688 Респ. Беларусь, МПК E02D27/12 / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов, Н.С. Лобастов, В.П. Лебедик; заявитель РУП «Институт «БелНИИС». – № а 20111166; заявл. 02.09.2011; опубл. 02.09.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011.
5. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер. – М: Metallurgia, 1969. – 155 с.
6. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 12248-2010. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2013. – 83 с.
7. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием: ГОСТ 19912-2001. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2004. – 25 с.
8. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 20276-99. Грунты. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2000. – 25 с.
9. Якуненко, С.А. Экспериментальные исследования армированных грунтобетонными микросваями оснований плитных фундаментов / С.А. Якуненко // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2013. – С. 379–387.
10. Рекомендации по проектированию и устройству вертикально армированных оснований (геомассивов) для плитных фундаментов зданий и сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь: Р1.02.133-2014. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2014. – 28 с.
11. Рекомендации по проектированию и устройству грунтобетонных свай в бурораздвижных скважинах. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2005. – 51 с.

Поступила 21.08.2015

**RESEARCH OF VERTICAL REINFORCED  
BY SOIL-CONCRETE MICROPILES SLAB FOUNDATIONS' GROUND BASES  
AND TESTING RESULTS IN INDUSTRIAL PRACTICE**

**V. KRAVTSOV, S. JAKUNENKO, P. LAPATSIN**

*Final results and practical application of the method of vertical ground reinforcement for hardening low-strength slab foundations' bases are considered. The optimal percentage of reinforcement, constructive characteristics of geomassif (increment, length, diameter) are presented and principles of calculation are developed. The example of specific object shows that technological schemes of geomassif implementation, developed in RUE "Institute BelNIIS", allow to reduce deformability of low-strength bases in 2...3 times.*

УДК 691.175.3

**СТЕКЛОПЛАСТИКОВАЯ И УГЛЕПЛАСТИКОВАЯ АРМАТУРА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ:  
ПРЕИМУЩЕСТВА, НЕДОСТАТКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

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

*Рассматривается композитная арматура на основе стеклянных и углеродных волокон, а также сравнительно новая на строительном рынке арматура из стеклоармированного вторичного полиэтилентерефталата. Перечислены основные факторы, оказывающие влияние на физико-механические характеристики композитов. В ходе сравнительного анализа свойств композитных материалов с разным типом армирующего волокна выявлены преимущества и недостатки арматуры типа АСПЭТ по сравнению со стандартной стеклопластиковой арматурой. Приведены примеры применения композитной арматуры в строительных конструкциях зданий и сооружений, определены области наиболее эффективного использования различных типов композитов. Показаны перспективные направления применения композитной арматуры из стеклоармированного вторичного полиэтилентерефталата в армобетонных конструкциях, области дальнейших исследований её свойств и работы в армобетонных элементах.*

**Введение.** В течение последних 15 лет композитные материалы стали коммерчески выгодными в качестве арматуры для изгибаемых бетонных конструкций. Сейчас каждый год в мире используется более 10 миллионов погонных метров такой арматуры. Начало применения современных композитных материалов – середина XX века. Такие композиты, особенно на основе углеродных волокон, нашли своё применение в авиакосмической промышленности как лёгкий материал с приемлемой прочностью и жёсткостью, который уменьшал вес элементов самолётов, например, камеры высокого давления и контейнеров. Позже материал нашёл широкое применение в автомобильной промышленности и строительстве [1 и др.]. Масштабное внедрение в строительную практику стало возможным в первую очередь за счёт ряда положительных свойств неметаллической арматуры: высокая термостойкость, коррозионная стойкость к воздействию агрессивных газовых и жидких сред, высокая прочность на растяжение, высокая усталостная прочность, диэлектрические свойства, радиопрозрачность и др.

В настоящее время в строительстве для армирования железобетонных конструкций применяется арматура из композитных материалов на основе углеродных, арамидных, полиэфирных, базальтовых и стекловолокон [2]. Эти виды материалов различаются по механическим характеристикам. Арамидные и стекловолокна соответственно имеют прочность на растяжение 3200...3600 и 483...1600 МПа при модуле упругости 124...130 и 35...51 ГПа. Углеродные волокна имеют прочность на растяжение от 2200 до 7200 МПа при модуле упругости в диапазоне от 200 до 785 ГПа [3; 4].

Для армирования железобетонных конструкций среди композитных материалов наиболее часто используется арматура на основе базальтовых и стекловолокон. Ограничением к широкому применению этой арматуры является, в частности, низкий модуль упругости и необходимость предварительного напряжения. Модуль упругости арматуры из углеродных волокон близок по значению к модулю упругости стальной арматуры, при этом углеродные волокна обладают высокой прочностью на растяжение, а также рядом других положительных свойств, что делает их привлекательными в применении, несмотря на относительную дороговизну этого материала. Композитная арматура имеет и ряд недостатков: низкая огнестойкость, необходимость защиты от воздействия ультрафиолетового излучения, низкий модуль упругости (для стекловолокон) [5].

**Современные композитные материалы на основе стеклянных и углеродных волокон: свойства, перспективы применения.** Композитные материалы изготавливаются из непрерывных волокон, пропитанных полимерными смолами. Армирующие волокна составляют основу материала и определяют его прочность и жёсткость. Полимерная матрица, в свою очередь, необходима для выполнения следующих основных функций: связь волокон и защита поверхности от повреждений во время обработки, изготовления и эксплуатации; передача нагрузки на волокно. Немаловажно отметить, что матрица должна быть химически и термически совместима с волокнами, играя при этом существенную роль в напряженно-деформированном состоянии композита и его устойчивости к агрессивным средам. Тип полимерной матрицы также влияет на механизм разрушения материала [6].

На сегодняшний день наиболее распространённым в строительстве композитным материалом является **стеклопластиковая арматура (СПА)**. Стеклопластиковая арматура (рис. 1, а) представляет собой гетерогенную систему, состоящую из ориентированных стеклянных волокон и полимерного связующего.

Свойства стеклопластиковой арматуры зависят от свойств и особенностей структуры стеклянных волокон и полимерной матрицы, а также физико-химического взаимодействия этих компонентов, их со-

вместной работы в процессе восприятия внешних нагрузок, воздействия агрессивных реагентов, изменений температурно-влажностного режима и других факторов. Знание свойств исходных материалов позволяет управлять свойствами стеклопластиковой арматуры. Отмечается, что высокопрочное стеклянное волокно в стеклопластиковой арматуре почти полностью воспринимает воздействия растягивающих усилий, определяет деформативность арматуры, обуславливает изменение прочностных характеристик под влиянием внешних факторов. Поэтому свойства арматуры в основном определяются свойствами стеклянного волокна, а полимерное связующее выступает в роли клеящей среды, объединяющей отдельные волокна в монолитный стержень, обеспечивая тем самым их совместную работу и защиту волокон от внешних агрессивных воздействий, а также сцепление с бетоном в конструкциях [7]. Для всех типов стеклопластиковой арматуры относительное удлинение прямо пропорционально растягивающей нагрузке вплоть до разрушения. Это является причиной хрупкого разрушения железобетонных конструкций, армированных только стеклопластиковой арматурой. В [7] подтверждено, что прочность и модуль упругости при растяжении существенно зависят от диаметра стержня: чем меньше диаметр арматуры, тем выше её прочность и модуль упругости.

Стеклопластиковая арматура нашла своё практическое применение в конструкциях из лёгких бетонов, элементах фундаментов, электролизных ваннах, балках и ригелях эстакад, опорных конструкциях конденсаторных батарей, плитах крепления откосов. На территории СНГ функционируют несколько объектов из конструкций, армированных стеклопластиком, которые до сих пор не потеряли своих эксплуатационных качеств, например, маяк в Сочи, построенный около 40 лет назад. В 1975 году в Гродно и Солигорске сданы в эксплуатацию два опытных участка ЛЭП с траверсами из стеклопластбетона. На кислотной станции Светлогорского комбината искусственного волокна перекрытия над технологическими галереями выполнены из полимербетона со стеклопластиковой арматурой. Стоит отметить, что при обследовании объектов с применением СПА, построенных в качестве экспериментальных в период с 1975 по 1989 год, эффект предварительного напряжения стеклопластиковой арматуры за время эксплуатации остался без изменений [8].

Практическое применение стеклопластиковой арматуры реализовано в Южной Америке, где было построено здание винного завода в Британской Колумбии (1998). В Канаде арматура из композитных материалов использовалась для строительства нескольких демонстрационных проектов автодорожных мостов. Во второй половине 90-х годов здесь сданы в эксплуатацию четыре автодорожных моста, при возведении которых была использована композитная арматура (мост в северной провинции Манитоба, мост через реку Сен-Франсуа и т. д.). Сегодня Канада занимает лидирующие позиции по применению арматуры из стеклопластика при строительстве мостового настила [5].

В настоящее время на строительном рынке Республики Беларусь можно встретить стеклопластиковую *арматуру тина АСПЭТ* (рис. 1, б), изготавливаемую из однонаправленно армированного вторичного полиэтилентерефталата (ПЭТ) методом пултрузии.



а – образцы арматуры СПА; б – образцы арматуры АСПЭТ

Рисунок 1 – Стеклопластиковая арматура

Арматура из стеклоармированного вторичного полиэтилентерефталата является разновидностью композитной арматуры АСП, но в силу специфики применяемой матрицы отличается от СПА меньшей ценой и физико-механическими свойствами (сравнительный анализ свойств СПА, АСПЭТ и углепластиковой арматуры (УПА) представлен в таблице).

Арматура типа АСПЭТ по ГОСТ 12.1.044 относится к группе горючих материалов средней воспламеняемости. Производитель гарантирует, что физико-механические характеристики не изменяются в интервале температур от минус 40 до плюс 60 °С. Арматура при нормальных условиях не оказывает вредного влияния на организм человека, не токсична. Для производства АСПЭТ используют следующие материалы:

- стеклоровинг марки ЕС 13 2400Н-54С(400) (согласно ТУ ВУ 300059047.051-2003 Ровинг стеклянный) или иной марки, негорючий, обеспечивающий установленные показатели качества арматуры;

- полиэтилентерефталат вторичный (согласно ТУ ВУ 37391 633.001-2000 Сырьё полимерное вторичное), в который могут вводиться красители и модифицирующие добавки, горючий материал, температура воспламенения 390...400 °С.

#### Механические свойства композитной арматуры

Показатель	Углепластиковая арматура	Стеклопластиковая арматура типа СПА	Стеклопластиковая арматура типа АСПЭТ
Плотность г/см <sup>3</sup>	1,5...1,6	1,25...2,1	1,7
Прочность на растяжение, МПа	2200...7200	483...1600	510
Модуль упругости, ГПа	200...785	35...51	27
Удлинение при разрыве, %	0,5...1,7	1,2...3,1	2,5

Потребительские свойства стеклопластиковой арматуры АСПЭТ (согласно ТУ ВУ691148143.002-2011 Арматура из стеклоармированного вторичного полиэтилентерефталата) обусловлены технологическими особенностями ее производства, в частности использованием термопластичного связующего полиэтилентерефталата (в том числе вторичного, что является актуальным вопросом на сегодняшний день). Это обстоятельство позволило добиться определенного снижения себестоимости получаемых изделий (их итоговая цена несколько ниже, чем цена на АСП и УПА). В отличие от АСП и УПА, стеклопластиковая арматура АСПЭТ может быть повторно переработана, так как в качестве связующего используется термопластичный полимер. При этом использование термопластичного ПЭТ в качестве связующего не позволяет добиться такой степени пропитки армирующего элемента, как при помощи термореактивных смол, используемых при изготовлении АСП и УПА. В итоге физико-механические свойства и прочностные характеристики АСПЭТ уступают аналогичным показателям других композитных материалов. Однако стоит отметить тот факт, что АСПЭТ обладает более хорошей гибкостью, нежели стандартная СПА, что позволяет использовать её вместо проволоки.

Анализ эксплуатационных характеристик и потребительских свойств стеклопластиковой арматуры АСПЭТ свидетельствует о том, что свойства данной арматуры изучены недостаточно и требуют дальнейших исследований в этой области.

Предполагается возможное использование АСПЭТ в следующих направлениях:

- гибкие связи трехслойных каменных стен зданий и сооружений гражданского и промышленного и сельскохозяйственного строительства, включающих несущий слой, облицовочный слой и слой жесткого утеплителя;

- армирование бетонных конструкций, эксплуатируемых в химически агрессивных средах (полы производственных цехов, животноводческие комплексы, химические производства и тому подобное);

- армирование изделий из бетонов без предварительного напряжения (дорожные и тротуарные плиты, заборные плиты, столбики и опоры; фасонные изделия для коллекторов, трубопроводных и коммунальных систем (теплоцентрали, кабельные каналы));

- армирование бетонных конструкций, эксплуатируемых в электромагнитно агрессивных средах (осветительные опоры, опоры ЛЭП и тому подобное);

- армирование бетонных конструкций инфраструктуры канализации, мелиорации и водоотведения;

- армирование фундаментов в малоэтажном строительстве;

- армирование при стяжке полов и облицовке стен.

Также стоит отметить, что в перспективе предполагается использование АСПЭТ в качестве предварительно напряженной арматуры с пологим отгибом в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов, что потребует дальнейших исследований в этой области.

На сегодняшний день самым высокопрочным композитным материалом, но и самым дорогостоящим является *углепластик*. В последние годы возросло применение композитной арматуры на основе углеродных волокон для армирования железобетонных конструкций, в том числе и в качестве дополнительной арматуры при усилении. Композитные материалы на основе углеродных волокон (рис. 2) обладают высокой прочностью на растяжение при высоком модуле упругости, сопоставимым с модулем упругости стали. Свойства углеродных волокон зависят от типа исходного материала и степени его карбонизации.

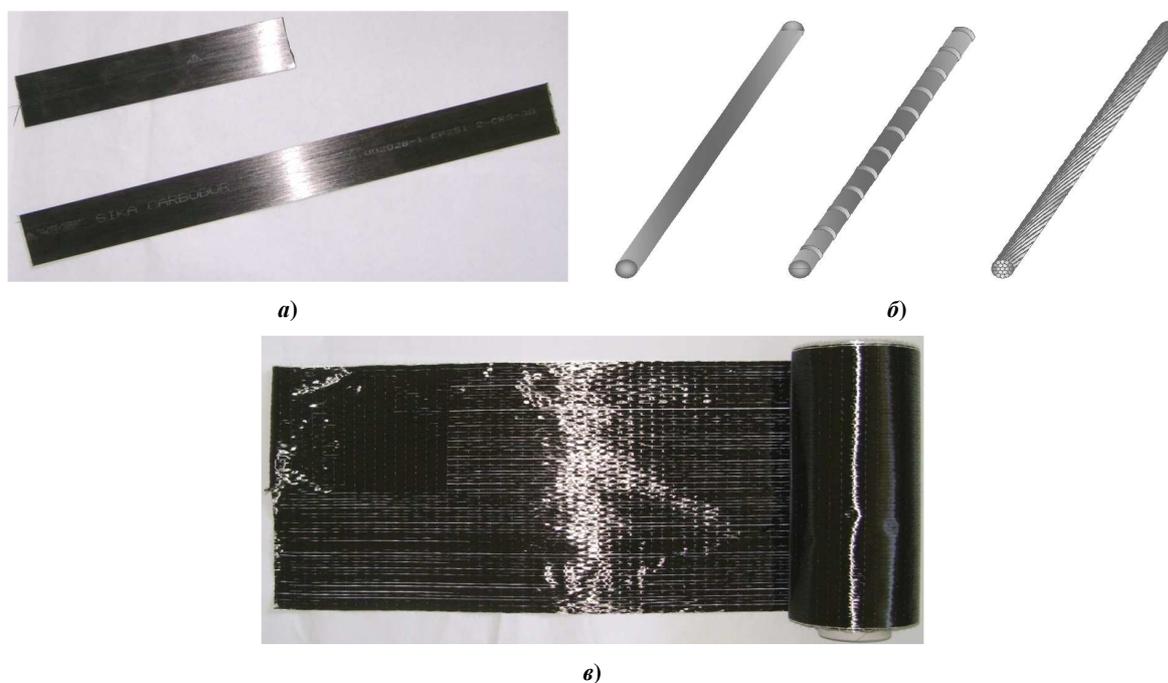
Впервые углеродные волокна на основе вискозных волокон были получены в 1958 году (Roger Bacon, США). Волокна содержали около 20% углерода и имели невысокие механические характеристики (прочность на растяжение 330...1030 МПа и модуль упругости 40 ГПа) [9].

В 50-х годах XIX столетия в СССР и несколько позже, в 1961 году, в Японии получили углеродные волокна на основе полиакрилонитрильных (ПАН) волокон с содержанием углерода около 55%. Физико-механические характеристики первых углеродных волокон на основе ПАН также были невысоки, но уже к 1970 году в результате совершенствования технологии были получены углеродные волокна на основе ПАН-волокон с пределом прочности на растяжение 2070 МПа и модулем упругости 480 ГПа.

Первые углеродные волокна на основе нефтяных пеков были произведены в 1970 году в Японии. Эти волокна содержали около 85% углерода и имели высокие прочностные свойства [9; 10]. На настоящий момент существует три основных типа углеродных волокон, производимых на основе целлюлозных, ПАН и пековых (из очищенной нефти или каменного угля) волокон.

Углеродные волокна получают термической обработкой исходных волокон. В зависимости от типа сырья отличаются режимы и условия термообработки. После изготовления исходных волокон их нагревают до температуры 200...300 °С на воздухе. Этот процесс называют окислением (например, для ПАН-волокон) или обработкой для придания неплавкости (для пековых волокон). В процессе окисления плотность исходных волокон увеличивается, повышается стойкость волокон к плавлению при нагревании. После окисления следуют стадии высокотемпературной обработки. Окисленные волокна нагревают в среде азота или (реже) аргона с повышением температуры до 800...1500 °С (карбонизация). Термическая обработка при 1500...3000 °С (графитизация) также проходит в инертной среде. Карбонизацию и графитизацию волокон производят под натяжением, что позволяет повысить механические свойства (прочность, модуль упругости) углеродных волокон. Процесс производства заканчивается поверхностной обработкой волокон, что улучшает их адгезионные свойства.

Арматуру из композитных материалов применяют в виде холстов, пластин (или полос), а также гладких и рифленых арматурных стержней, проволоки, канатов, прядей (рис. 2). Объединение отдельных стержней в сетки и каркасы осуществляется стальной проволокой, полипропиленовыми хомутами, с помощью пластиковых клипс.



*a* – пластина; *б* – стержневая и канатная арматура; *в* – холст

**Рисунок 2 – Арматура из углеродных волокон**

Основное назначение арматуры в виде стержней, проволоки, канатов, прядей – замена стальной арматуры в новых строительных конструкциях с целью предотвращения ее коррозии в агрессивных условиях эксплуатации. В то же время арматура из композитных материалов такого вида используется и в качестве дополнительной арматуры при усилении железобетонных конструкций. Известен метод усиления многослойных плит перекрытий установкой дополнительной продольной арматуры из композитных материалов (стекловолоконной арматуры) в пустоты [11].

Высокая коррозионная стойкость арматуры из углеродных волокон определяет область её использования в строительстве – в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды (в конструкциях зданий и сооружений химических предприятий, водоочистных сооружений, канализационных, мелиоративных систем и др.). Расход арматуры из углеродных волокон, обладающей высокой прочностью, ниже по сравнению с расходом стальной арматуры, а срок эксплуатации конструкций увеличивается. Широко применяется арматура из углеродных волокон в дорожном строительстве при возведении автомагистралей: процесс монтажа сеток и каркасов из данного вида арматуры занимает незначительное

время, не требует специальных приспособлений, небольшой собственный вес арматуры благоприятствует ее транспортировке в больших количествах. Благодаря высокой прочности на растяжение и высокой усталостной прочности арматура из углеродных волокон находит применение в мостостроении. Примерами использования стержневой и канатной арматуры из углеродных волокон в строительстве являются следующие сооружения: мост в Канаде, туннельная железная дорога под рекой Темза (Лондон), конструкции береговой линии реки Fasia, Перл-Харбор (Гавайи) [12].

Холсты и пластины из углеродных волокон широко используются в зарубежной практике для усиления железобетонных конструкций. Холсты представляют собой гибкую ткань, в которой волокна расположены в одном или двух направлениях. Соединение холста с усиливаемой конструкцией осуществляют путем его утапливания в нанесенный на поверхность конструкции полимерный клей – матрицу. В основном холсты применяют для усиления сжатых и сжато-изгибаемых конструкций колонн, стен, а также для усиления зоны среза изгибаемых конструкций и консолей. Однако их используют и для повышения прочности по нормальному к продольной оси сечению и жесткости изгибаемых конструкций [13; 14]. При изготовлении пластин углеродные волокна утапливают в заводских условиях в полимерную матрицу из смол: эпоксидной, полиэфирной, поливиниловой, полиамидной или фенолформальдегидной [15]. Объемное содержание углеродных волокон в пластинах составляет 50...70%. Как и в холстах, в пластинах волокна могут располагаться в одном или в двух направлениях.

Впервые метод усиления железобетонных конструкций приклеиванием дополнительной арматуры в виде пластин из углеродных волокон был применен вне лаборатории в 1991 году для конструкций моста Ибах в Люцерне (Швейцария) [1]. С тех пор этот метод усиления был использован в мировой практике при разработке множества проектов по конструктивному ремонту и реконструкции и применен для строительных конструкций различных объектов. Из числа усиленных железобетонных конструкций, работающих на изгиб, можно привести следующие типичные примеры: балконные плиты многоэтажного жилого дома в г. Хемнитц (Германия); консольные балконные плиты в Лоано-Генова (Италия); ребристые плиты покрытия в здании больницы Кингз-Колледжа (Великобритания); ступени железобетонной лестницы в школе Ярборо, Линкольн (Великобритания); перекрытие городской больницы в г. Люблин (Польша); балка эстакады вдоль трассы им. Квятковского в Гдыни (Польша) [4]; ригели перекрытия здания Девятого арбитражного апелляционного суда и спортзала административного корпуса ОАО «ДСК-3» в Москве (Россия) [15].

Широкая область применения композитных материалов из углеродных волокон – усиление большепролетных несущих конструкций мостов, что объясняется возможностью применять пластины из углеродных волокон большой длины и возможностью проведения работ по реконструкции в короткие сроки с минимальной остановкой в движении транспорта. Примерами международного опыта усиления конструкций мостов системой предварительного напряжения Sika® StressHead являются: мост на автомагистрали А3 через канал Эшер (г. Гларус, Швейцария); мост Гюттен, Вертенштайн, (г. Люцерн, Швейцария); мост Санг Сан (г. Сеул, Корея); мост Клинтон & Хопкинс, Огайо (США); мост Рочдейл (Великобритания); путепровод на магистрали А7 (г. Зандейк, Голландия). Образцы усиления пластинами из углеродных волокон Sika®CarboDur – конструкции моста над рекой Вьяр в Перемышле (Польша), бетонные корчатые секции над опорами моста на Дмитровском шоссе в Москве (Россия) [4].

Таким образом, арматура из углеродных волокон нашла широкое применение в зарубежной практике строительства. Благодаря ряду положительных свойств, таким как высокая прочность на растяжение при достаточно высоком модуле упругости, коррозионная стойкость, высокая усталостная прочность, небольшой собственный вес, простота монтажа и др., арматура из углеродных волокон выступает хорошей альтернативой стальной арматуре как в новом строительстве, так и для усиления конструкций ряда действующих объектов.

В Республике Беларусь система усиления конструкций композитными материалами используется сравнительно недавно. Однако уже имеется положительный опыт применения пластин из углеродных волокон Sika CarboDur для усиления несущих конструкций мостов (например, пролетного строения автодорожного моста через Неман на трассе М1 «Брест – граница Российской Федерации») и перекрытий ряда гражданских объектов (в том числе плит перекрытия торгового дома «Ждановичи», ригелей Дворца спорта и монолитного перекрытия ТРЦ «Александров Пассаж» в Минске) [4].

**Заключение.** На сегодняшний день арматура на основе стеклянных и углеродных волокон – один из перспективных материалов на строительном рынке. Однако широкому её применению препятствует ряд недостатков в сравнении с традиционной металлической арматурой железобетонных конструкций. Наиболее распространена стеклопластиковая арматура, которую всё больше используют в качестве рабочей арматуры строительных конструкций. Арматура из углеродных волокон в основном применяется для усиления конструкций действующих зданий и сооружений. Арматура АСПЭТ, несмотря на более низкие физико-механические характеристики, чем у других композитов на основе стеклянных и углеродных волокон, обладает рядом положительных качеств. Во-первых, АСПЭТ изготавливают с использованием вторичного полиэтилентерефталата, что делает такую арматуру экономически более выгодной по срав-

нению с остальными композитами. Во-вторых, имеет более высокую гибкость, чем стандартная СПА, что обеспечивает её использование вместо проволоки.

Дальнейшие исследования арматуры типа АСПЭТ позволят расширить область её применения в армобетонных конструкциях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Motavalli, M. FRP composites for retrofitting of existing civil structures in Europe: state-of-the-art review / M. Motavalli, C. Czaderski [Electronic resource]. – American Composites Manufacturers Association, 2007. – Mode of access: <http://www.acmanet.org/resources/07papers/Motavalli183.pdf>. – Date of access: 23.01.2012.
2. Лешкевич, О.Н. Перспективы применения композитной арматуры / О.Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симп. (Минск, 9–11 нояб. 2011 г.): в 2 т. / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь; Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 233–238.
3. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э.С. Зеленский [и др.] // Рос. хим. журнал (Журнал Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева). – 2001. – Т. XLV, № 2. – С. 56–74.
4. Информационные материалы фирмы Sika [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sika.com.au>; <http://sika.ru>. – Дата доступа: 08.12.2011.
5. Теплова, Ж.С. Стеклопластиковая арматура для армирования бетонных конструкций / Ж.С. Теплова, С.С. Киски, Я.Н. Стрижакова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – М., 2014. – № 9(24). – С. 49–63.
6. Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. Technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, 2007.
7. Фролов, Н.П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции / Н.П. Фролов. – М.: Стройиздат, 1980. – 104 с.
8. Компания Алиен Технолоджис. История применения композитной арматуры // Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alientechnologies.ru/articles/0000.php>. – Дата доступа: 10.11.2015.
9. Litvinov, A. Applying carbon fiber in building structures: Bachelor's Thesis / A. Litvinov. – Saimaa University of Applied Sciences, 2010. – 62 p.
10. Каданцева, А.И. Углеродные волокна: учеб. пособие / А.И. Каданцева, В.А. Тверской. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2008. – 55 с.
11. Мальганов, А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий: Атлас схем и чертежей / А.И. Мальганов, В.С. Плевков, А.И. Полищук. – Томск: Томский межотраслевой ЦНТИ, 1990. – 316 с.
12. Информационные материалы ЗАО «ХК Композит» [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: [http://www.atomeks.ru/mediafiles/u/files/presentA2011/Rafailov\\_E.R.pdf](http://www.atomeks.ru/mediafiles/u/files/presentA2011/Rafailov_E.R.pdf). – Дата доступа: 11.11.2015.
13. Considerations about non linear static analysis of a reinforced concrete frame retrofitted with FRP / M. Savoia [et al.] // Mecánica Computacional. – 2010. – Vol. XXIX, № 11. – P. 10173–10182.
14. Rosenboom, O. Analytical modeling of flexural debonding in CFRP strengthened reinforced or prestressed concrete beams / O. Rosenboom, S. Rizkalla // FRPRCS-8. – Patras, Greece, 2007.
15. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Издательство “Стройиздат”», 2007. – 184 с.

Поступила 02.12.2015

#### **GLASS FIBER AND CARBON FIBER REINFORCEMENT IN CONSTRUCTION: ADVANTAGES, DISADVANTAGES, PROSPECTS OF APPLICATION**

**A. HIL, E. BADALOVA, Y. LAZOUSKI**

*The article describes the characteristics of composite reinforcement based on glass and carbon fibers, as well as relatively new in the construction market of fiberglass reinforcement of secondary polyethylene terephthalate. List the main factors that affect the physical and mechanical properties of composites. In the comparative analysis of the properties of composite materials with different types of reinforcing fibers, found FRPPT advantages and disadvantages, compared to the standard FRP. Show examples of application of composite reinforcement in the building construction of buildings and structures identify areas to better use, most of the different types of composites. Presented promising areas of application of composite reinforcement in FRPPT reinforced concrete structures, areas of further studies of the properties of the reinforcement and its work in reinforced concrete elements.*

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 691.32-033.33

### ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ КЕРАМЗИТА ЗАВОДОВ БЕЛАРУСИ

*д-р техн. наук, проф. С.Д. СЕМЕНЮК; И.И. МЕЛЬЯНЦОВА; А.Г. ПОДГОЛИН  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

*Демонстрируются результаты экспериментальных и теоретических исследований прочностных и деформативных свойств легких бетонов классов CL 8/10, CL 10/12,5, CL 16/20 и CL 25/30 на основе керамзита заводов Беларуси при кратковременном центральном сжатии. Определены кубиковая и призмная прочностности, найдены модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, пределы микротрещинообразования бетонов.*

Применение легкого бетона значительно расширяется, так как его использование эффективно не только для наружных ограждений отапливаемых зданий, но и во всех случаях, когда необходимо уменьшить вес конструкций. Особое значение легкий бетон имеет для строительства зданий из крупных панелей и блоков, использование его существенно снижает трудоемкость, вес и стоимость сооружений. Комплексное использование легких бетонов позволяет решить проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и техническом обслуживании зданий и инженерных сооружений, повысить их надежность, долговечность и безопасность при эксплуатации. Однако для гармонизации белорусских нормативных документов с Еврокодом необходимо уточнить некоторые прочностные и деформативные характеристики легких бетонов, что для Республики Беларусь является актуальным. С этой целью проведены экспериментальные исследования прочности и деформативности образцов из легкого бетона на основе керамзита заводов Беларуси классов CL 8/10, CL 10/12,5, CL 16/20 и CL 25/30 в виде кубов, призм и цилиндров на кратковременное центральное сжатие в соответствии с ГОСТ 24452 [1].

**Характеристики опытных образцов и методика экспериментальных исследований.** Для определения прочностных и деформативных характеристик легких бетонов на основе керамзита заводов Беларуси были исследованы 4 серии опытных образцов из бетона классов CL 8/10, CL 10/12,5, CL 16/20 и CL 25/30. В каждой серии экспериментальных исследований было заформовано и испытано: 12 кубов с размером ребра 150 мм; 8 кубов с размером ребра 100 мм; 12 цилиндров диаметром 150 и высотой 300 мм; 12 призм размерами 150×150×600 мм. Испытания проводились в возрасте 7, 14, 28 и 60 суток. В каждом возрасте испытывалось: по 3 куба с размерами ребра 150 мм; 2 куба с размерами ребра 100 мм; 3 призмы размерами 150×150×600 мм; 3 цилиндра диаметром 150 и высотой 300 мм.

Для изготовления легкого бетона класса CL 8/10 в качестве крупного заполнителя использовался керамзитовый гравий фракций 5...10 и 10...20 мм; в качестве мелкого заполнителя – песок керамзитовый фракции 0...4 мм ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». В качестве крупного заполнителя для бетона класса CL 16/20 использовался керамзитовый гравий фракций 5...10 и 10...20 мм с относительной прочностью в цилиндре 2,68 и 1,86 МПа соответственно. Для изготовления легкого бетона класса CL 10/12,5 применялся только керамзит фракции 10...20 мм. Для изготовления легкого бетона класса CL 25/30 в качестве крупного заполнителя использовался керамзит щебнеподобный фракции 5...10 мм Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК». Мелким заполнителем для бетонов классов CL 25/30, 16/20 и 10/12,5 служил песок кварцевый с модулем крупности  $M_{кр} = 1,8$ . Вяжущим для всех серий использовался портландцемент ОАО «Белорусский цементный завод» марки М 500.

Состав керамзитобетонных смесей:

- для бетона класса CL 25/30 – Ц : П : Щ = 1 : 1,84 : 0,79 при водоцементном отношении В/Ц = 0,4. Плотность бетона в возрасте 28 суток – 1780 кг/м<sup>3</sup>;
- для бетона класса CL 16/20 – Ц : П : Г = 1 : 1,84 : 0,79 при водоцементном отношении В/Ц = 0,46. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1545 кг/м<sup>3</sup>;
- для бетона класса CL 10/12,5 – Ц : П : Г = 1 : 2,41 : 1,37 при водоцементном отношении В/Ц = 0,51. Плотность керамзитобетона в возрасте 28 суток – 1390 кг/м<sup>3</sup>;
- для бетона класса CL 8/10 – Ц : П : Г = 1 : 0,52 : 1,05 при водоцементном отношении В/Ц = 0,63. Плотность бетона в возрасте 28 суток – 950 кг/м<sup>3</sup>.

Составы бетонных смесей подбирались в соответствии с «Рекомендациями по подбору, изготовлению и применению конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов», подготовленных РУП «Институт БелНИИС» [2].

Бетонную смесь приготавливали в лабораторных условиях вручную. Для изготовления образцов использовались инвентарные металлические сборно-разборные формы. Распалубливание проводилось на шестые сутки. Экспериментальные образцы находились в естественных температурно-влажностных условиях цеха испытания конструкций, где и проходило их испытание на кратковременное действие нагрузки.

Испытание призм на кратковременное центральное сжатие проводилось в полном соответствии с требованиями [1]. Нагружение призм образцов до их разрушения производилось с постоянной скоростью роста напряжений ( $0,6 \pm 0,2$  МПа/с) ступенями, равными 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки. При испытании продольные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 370...375 мм, установленными вдоль оси по четырем граням призм. Поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 110...115 мм. Продольные и поперечные деформации по каждой отдельной призме (по показаниям четырех приборов механического действия) усреднялись. При отдельных отчетах, резко отличавшихся от среднего, эти отчеты и соответствующие им деформации по отдельным приборам из обработки опытных деформаций исключались.

Анализ экспериментальных данных позволил описать кинетику роста бетонов во времени гиперболической зависимостью  $f_c^t = f_c^{28} \cdot \frac{t}{0,85 \cdot t + 4,2}$ , при этом отклонение экспериментальных данных от предложенной зависимости не превышало 3%.

**Экспериментально-статистическая оценка деформативных характеристик легкого бетона.** В работах [3; 4] показано, что зависимость «секущий модуль продольных деформаций – напряжение или уровень напряжений» (« $E_c - \sigma$ »), (« $E_c - \eta$ ») при кратковременном центральном сжатии бетонных призм до разрушения с постоянной скоростью роста напряжений с большой достоверностью описывается линейной опытно-корреляционной зависимостью (1), а непосредственно вытекающая из нее зависимость «напряжение – деформация» – корреляционной зависимостью (2) гиперболического вида:

$$E_{c(cf)} = \frac{\sigma}{\epsilon_{c(cf)}} = E_{c(0)} \cdot [1 - \lambda_{c(cf)} \cdot \eta], \quad (1)$$

$$\epsilon_{c(cf)} = \frac{\sigma}{E_{cf}} = \frac{\sigma}{E_{c(0)} \cdot \left[1 - \lambda_{c(cf)} \cdot \frac{\sigma}{f_c}\right]}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – уровень напряжений;  $E_{c(0)}$  – истинный модуль упругости бетона (секущий модуль деформации при  $\sigma = 0$ );  $\lambda_{c(cf)}$  – предельное значение коэффициента пластичности бетона при  $\sigma = f_c$ .

Статистическая обработка результатов испытаний бетонных призм показала, что линейные корреляционные зависимости «секущие модули деформаций – напряжения или уровень напряжений» имеют место для поперечных и сдвиговых деформаций:

$$E_{v(cf)} = \frac{\sigma}{\epsilon_{v(cf)}} = E_{v(0)} \cdot [1 - \lambda_{v(cf)} \cdot \eta], \quad (3)$$

$$\epsilon_{v(cf)} = \frac{\sigma}{E'_{v(cf)}} = \frac{\sigma}{E_{v(0)} \cdot \left[1 - \lambda_{v(cf)} \cdot \frac{\sigma}{f_c}\right]}, \quad (4)$$

$$G_{cf} = \frac{\sigma}{\epsilon_{G(cf)}} = \frac{\sigma}{2 \cdot [\epsilon_{c(cf)} + \epsilon_{v(cf)}]} = G_{(0)} \cdot \left[1 - \lambda_{G(cf)} \cdot \frac{\sigma}{f_c}\right], \quad (5)$$

$$\epsilon_{G(cf)} = \frac{\sigma}{G_{(cf)}} = \frac{\sigma}{G_0 \cdot \left[1 - \lambda_{G(cf)} \cdot \frac{\sigma}{f_c}\right]}, \quad (6)$$

$$\epsilon_{G(cf)} = 2 \cdot [\epsilon_{c(cf)} + \epsilon_{v(cf)}]. \quad (7)$$

Здесь  $E_{v(cf)}$ ,  $G_{cf}$  – секущие модули поперечных упругопластических деформаций и деформаций сдвига;  $\epsilon_{v(cf)}$ ,  $\epsilon_{G(cf)}$  – соответствующие вышеуказанным секущим модулям деформаций упругопластические поперечные деформации и деформации сдвига при сжатии;  $E_{v(0)}$ ,  $G_0$  – испытанные значения модулей упругих

поперечных и сдвиговых деформаций;  $\lambda_{v(f_c)}$ ,  $\lambda_{G(f_c)}$  – коэффициенты пластичности по поперечным и сдвиговым деформациям при напряжении  $\sigma = f_c$ .

Численные значения параметров линейных корреляционных зависимостей (1), (3), (5) устанавливаются статистически методами линейной корреляции.

Величиной, выражающей прямолинейную зависимость между двумя свойствами, является коэффициент корреляции. Чем ближе коэффициент корреляции к единице, тем больше связь между изучаемыми свойствами. Коэффициент корреляции  $r$  вычисляют по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_c^2 \cdot Y_c^2}}, \quad (8)$$

где  $\sum_{i=1}^n (X_c \cdot Y_c)$  – отклонения отдельных вариантов  $V_x$ ,  $V_y$  от соответствующих им средних арифметических  $M_x$  и  $M_y$ ;  $n$  – число наблюдений.

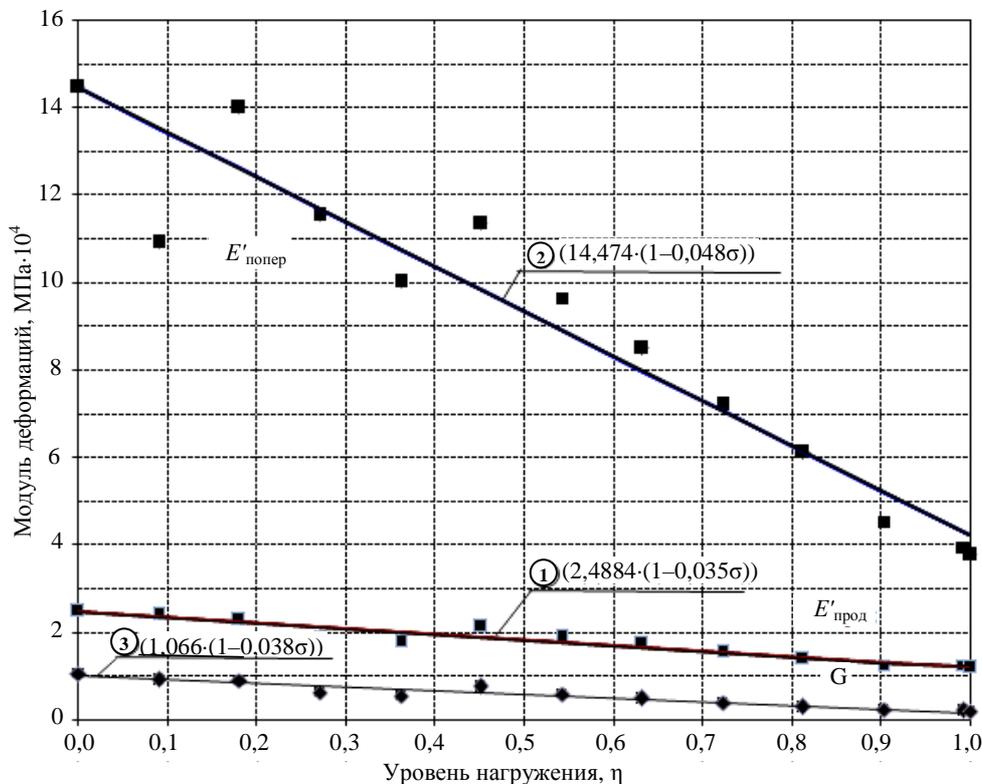
Средняя ошибка коэффициента корреляции

$$m_r = \pm \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}. \quad (9)$$

Достоверность коэффициента корреляции (линейного корреляционного уравнения или связи) оценивается отношением коэффициента корреляции  $r$  к его средней ошибке  $m_r$ . Если это отношение равно 4 или больше, коэффициент корреляции считается достоверным и наличие связи между двумя свойствами доказано, в противном случае нельзя сделать заключение о достоверности связи между изучаемыми свойствами.

Линейное корреляционное уравнение представлено следующей формулой:

$$Y = M_y + r \cdot \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot (X - M_x). \quad (10)$$



$$1 - (E'_{\text{прод}} - \eta); 2 - (E'_{\text{попер}} - \eta); 3 - (G - \eta)$$

Рисунок 1 – Опытные и теоретические зависимости «модуль деформаций – уровень нагружения» для образцов в возрасте 14 суток из бетона класса 16/20

Характеристики бетонов четырех серий испытанных образцов различного возраста и статистика их линейных корреляционных зависимостей отражены в таблицах 1–4.

**Таблица 1 – Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 16/20**

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c,cube}^G$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{crc}^V$		$f_{crc}^0$		Зависимость	Уравнение, МПа	$r$	$r/m_r$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа				
16/20	7	16,04	13,11	0,857	11,24	0,538	7,06	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,795(1 - 0,023\sigma) \cdot 10^4$	-0,9883	147,5
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$17,580(1 - 0,073\sigma) \cdot 10^4$	-0,7921	7,36
								$G_c - \eta$	$0,808(1 - 0,034\sigma) \cdot 10^4$	-0,9756	70,18
	14	18,1	14,68	0,812	11,92	0,531	7,8	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$2,4884(1 - 0,035\sigma) \cdot 10^4$	-0,9523	42,16
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$14,474(1 - 0,048\sigma) \cdot 10^4$	-0,9482	37,71
								$G_c - \eta$	$1,066(1 - 0,038\sigma) \cdot 10^4$	-0,9602	50,77
	28	20,56	16,21	0,776	12,58	0,505	8,18	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,687(1 - 0,014\sigma) \cdot 10^4$	-0,9397	43,77
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$16,224(1 - 0,05\sigma) \cdot 10^4$	-0,9357	60,2
								$G_c - \eta$	$0,843(1 - 0,026\sigma) \cdot 10^4$	-0,9874	162,3
	60	21,47	17,56	0,755	13,25	0,459	8,06	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,749(1 - 0,014\sigma) \cdot 10^4$	-0,9458	39,11
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$13,264(1 - 0,041\sigma) \cdot 10^4$	-0,8479	13,15
								$G_c - \eta$	$1,205(1 - 0,022\sigma) \cdot 10^4$	-0,9751	84,26

**Таблица 2 – Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 10/12,5**

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c,cube}^G$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{crc}^V$		$f_{crc}^0$		Зависимость	Уравнение, МПа	$r$	$r/m_r$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа				
10/12,5	7	8,92	7,12	0,75	5,34	0,495	3,52	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$0,964(1 - 0,055\sigma) \cdot 10^4$	-0,8647	16,069
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$7,026(1 - 0,115\sigma) \cdot 10^4$	-0,9632	62,588
								$G_c - \eta$	$0,430(1 - 0,07\sigma) \cdot 10^4$	-0,9167	26,961
	14	10,11	8,27	0,789	6,53	0,492	4,07	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,315(1 - 0,051\sigma) \cdot 10^4$	-0,9570	128,11
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$13,420(1 - 0,099\sigma) \cdot 10^4$	-0,9242	26,77
								$G_c - \eta$	$0,604(1 - 0,062\sigma) \cdot 10^4$	-0,9804	52,46
	28	11,82	9,89	0,779	7,70	0,477	4,72	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,251(1 - 0,043\sigma) \cdot 10^4$	-0,9757	81,418
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$9,180(1 - 0,087\sigma) \cdot 10^4$	-0,9572	45,76
								$G_c - \eta$	$0,560(1 - 0,055\sigma) \cdot 10^4$	-0,9835	120,45
	60	13,61	11,17	0,791	8,84	0,514	5,74	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,643(1 - 0,051\sigma) \cdot 10^4$	-0,9146	23,72
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$16,63(1 - 0,079\sigma) \cdot 10^4$	-0,9860	150,08
								$G_c - \eta$	$0,762(1 - 0,056\sigma) \cdot 10^4$	-0,9600	52,00

**Таблица 3 – Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 8/10**

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c,cube}^G$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{crc}^V$		$f_{crc}^0$		Зависимость	Уравнение, МПа	$r$	$r/m_r$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа				
8/10	7	8,06	6,4	0,701	4,49	0,448	2,87	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,262(1 - 0,0929\sigma) \cdot 10^4$	-0,9757	64,29
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$10,291(1 - 0,149\sigma) \cdot 10^4$	-0,9701	52,03
								$G_c - \eta$	$0,312(1 - 0,0125\sigma) \cdot 10^4$	-0,9841	196,8
	14	8,64	6,88	0,711	4,89	0,424	2,92	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,119(1 - 0,078\sigma) \cdot 10^4$	-0,9639	43,02
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$17,773(1 - 0,136\sigma) \cdot 10^4$	-0,8777	12,09
								$G_c - \eta$	$0,538(1 - 0,0907\sigma) \cdot 10^4$	-0,9858	110,8
	28	10,3	8,36	0,769	6,43	0,518	4,33	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$2,162(1 - 0,0938\sigma) \cdot 10^4$	-0,9799	78,03
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$14,676(1 - 0,120\sigma) \cdot 10^4$	-0,9772	68,67
								$G_c - \eta$	$0,951(1 - 0,1006\sigma) \cdot 10^4$	-0,9838	97,12

**Таблица 4 – Характеристика керамзитобетона испытанных образцов и статистика их линейных корреляционных зависимостей для класса 25/30**

Класс бетона	Возраст, сут	$f_{c,cube}^G$ , МПа	$f_{ck}$ , МПа	$f_{crc}^v$		$f_{crc}^0$		Зависимость	Уравнение, МПа	$r$	$r/m_r$
				$\eta$	МПа	$\eta$	МПа				
25/30	14	24,60	21,37	0,755	16,13	0,488	10,43	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,818(1 - 0,033\sigma) \cdot 10^4$	-0,9983	152,5
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$26,88(1 - 0,089\sigma) \cdot 10^4$	-0,8921	15,88
								$G_c - \eta$	$1,011(1 - 0,054\sigma) \cdot 10^4$	-0,9536	102,32
	21	30,86	27,24	0,771	21,00	0,501	13,65	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,918(1 - 0,045\sigma) \cdot 10^4$	-0,9322	82,16
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$25,22(1 - 0,052\sigma) \cdot 10^4$	-0,9233	47,71
								$G_c - \eta$	$1,087(1 - 0,048\sigma) \cdot 10^4$	-0,9712	88,15
	28	33,63	28,99	0,788	22,84	0,515	14,93	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$2,014(1 - 0,034\sigma) \cdot 10^4$	-0,9411	50,77
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$28,221(1 - 0,015\sigma) \cdot 10^4$	-0,9111	75,2
								$G_c - \eta$	$1,091(1 - 0,022\sigma) \cdot 10^4$	-0,9991	178,6
	60	34,07	29,86	0,795	23,74	0,535	15,98	$E_{c(\sigma)} - \eta$	$1,949(1 - 0,022\sigma) \cdot 10^4$	-0,9222	48,11
								$E_{v(\sigma)} - \eta$	$28,922(1 - 0,071\sigma) \cdot 10^4$	-0,8901	15,16
								$G_c - \eta$	$1,228(1 - 0,041\sigma) \cdot 10^4$	-0,9924	108,3

Важными характеристиками прочности и деформативности бетона являются пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования. При центральном кратковременном сжатии на начальной стадии наблюдается незначительное увеличение числа контактных микротрещин на границе частиц заполнителя и цементного камня до уровня, соответствующего нижней границе микротрещинообразования  $\eta_{crc}^0$ .

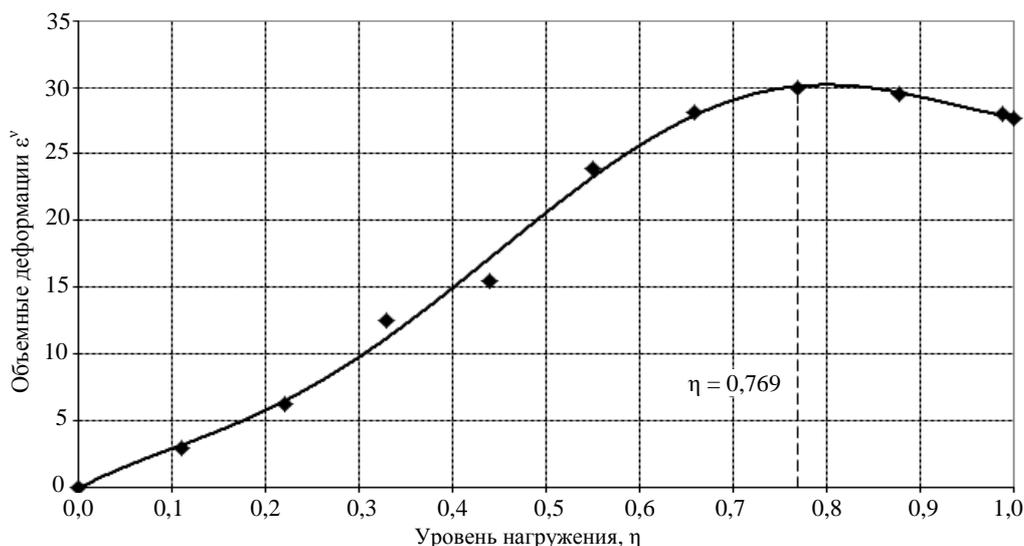
При превышении уровня  $\eta_{crc}^0$  наблюдается интенсивное увеличение длины, ширины раскрытия и числа контактных микротрещин, что приводит к появлению нелинейного участка на графике зависимости «напряжения – относительные деформации». Эта стадия характеризуется незначительным количеством микротрещин в цементном камне. Вместе с тем начинают появляться комбинированные микротрещины, объединяющие главным образом контактные микротрещины вокруг зерен заполнителя.

При достижении верхней границы микротрещинообразования  $\eta_{crc}^v$  увеличивается число и суммарная длина комбинированных трещин, возрастает их ширина раскрытия. На этой стадии начинают формироваться ярко выраженные микротрещины в цементном камне.

Определение верхнего предела микротрещинообразования производилось по результатам испытания образцов призм с размерами 150×150×600 мм графическим методом по усредненным экспериментальным данным путем построения зависимости «уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\varepsilon^v$ ». Объемные деформации  $\varepsilon^v$  при этом определяются по следующей формуле:

$$\varepsilon^v = \varepsilon_c - 2\varepsilon_v. \quad (11)$$

На рисунке 2 изображена зависимость «уровень нагружения  $\eta$  – объемная деформация  $\varepsilon^v$ » для образца из керамзитобетона класса 8/10 в возрасте 28 суток.



**Рисунок 2 – Корреляционные зависимости «уровень нагружения – объемные деформации» для образцов из бетона класса 8/10 в возрасте 28 суток**

Определение нижнего предела микротрещинообразования  $f_{срc}^0$  также производилось графическим методом по экспериментальным данным. Сначала по опытным данным была построена зависимость «уровень нагружения  $\eta$  – коэффициент Пуассона  $\nu$ », при этом коэффициент Пуассона определялся как отношение поперечных относительных деформаций к продольным или как отношение поперечного модуля деформаций к продольному для каждой ступени нагружения (рис. 3).

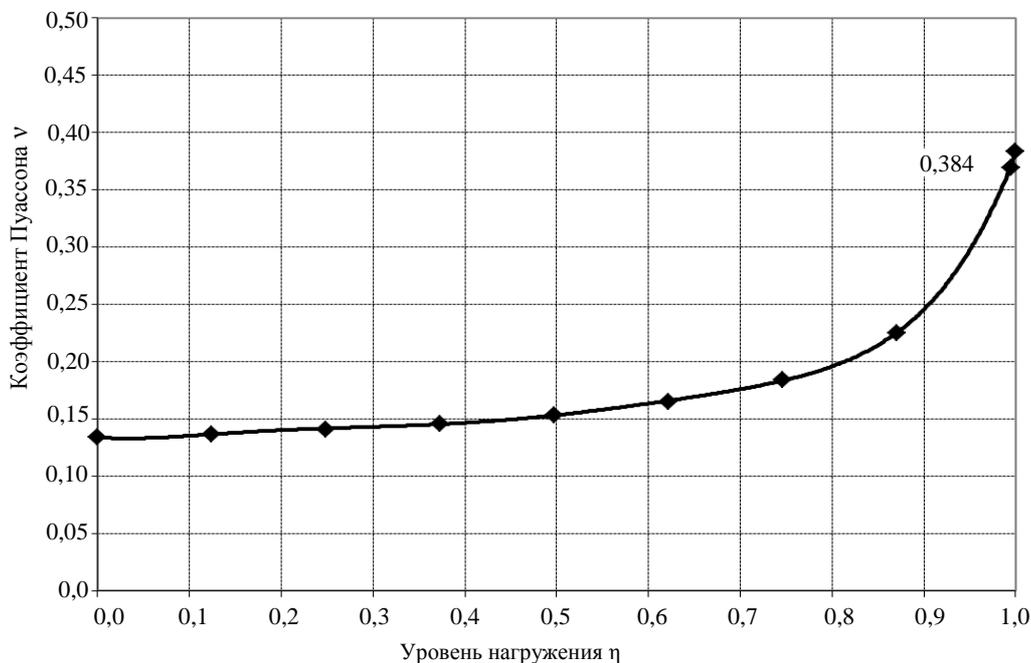


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости «уровень нагружения – коэффициент Пуассона» для образцов из бетона класса 8/10 в возрасте 28 суток

По корреляционным кривым зависимостей « $dv/d\eta - \eta$ » и « $d^2v/d\eta^2 - \eta$ » были определены соответственно верхняя  $\eta_{срc}^v$  и нижняя  $\eta_{срc}^0$  границы образования и развития продольных микротрещин отрыва при кратковременном сжатии бетона (рис. 4, 5).

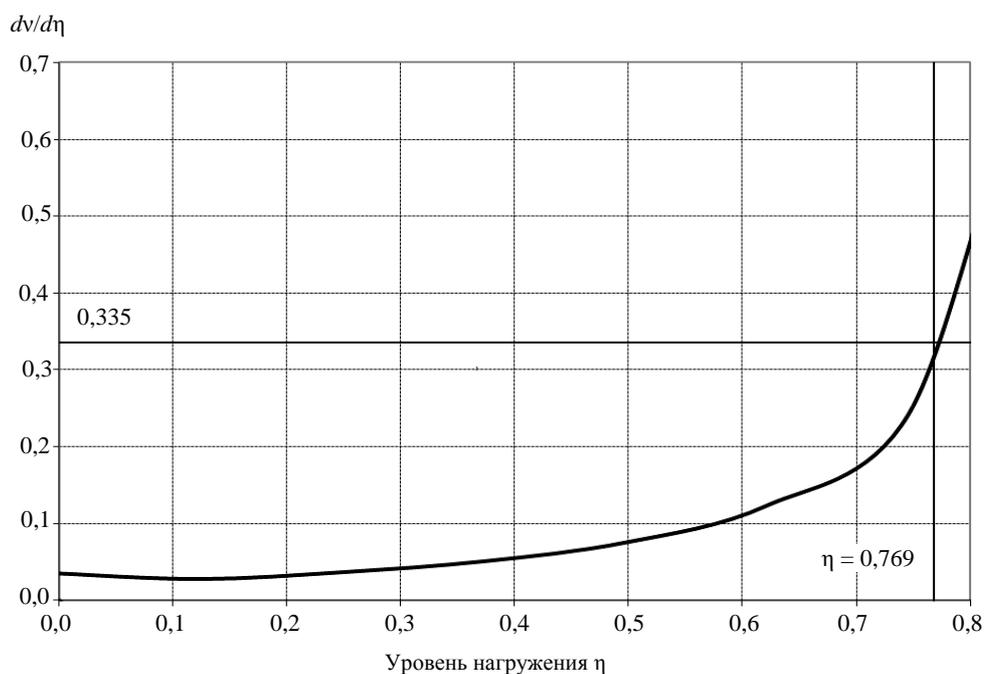


Рисунок 4 – Корреляционная зависимость (первая производная  $dv/d\eta$ ) для образцов из бетона класса 8/10 в возрасте 28 суток

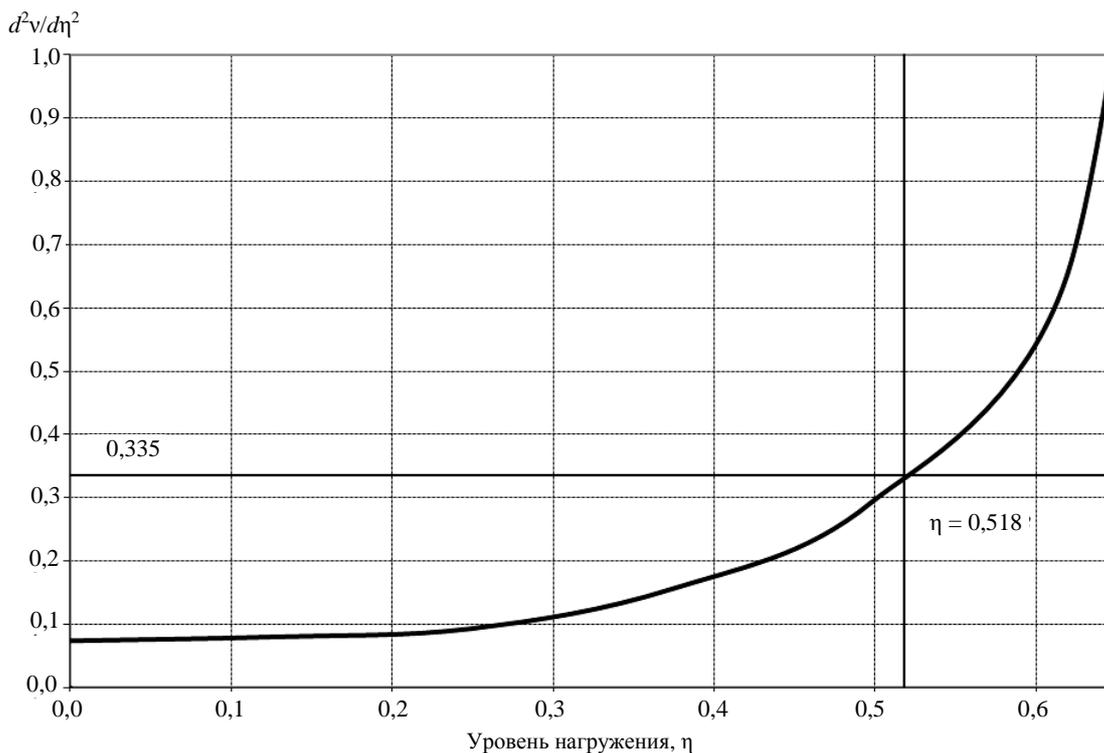


Рисунок 5 – Корреляционная зависимость (вторая производная  $d^2v/d\eta^2$ ) для образцов из бетона класса 8/10 в возрасте 28 суток

**Заключение.** Полученные данные можно использовать при прогнозировании работы керамзитожелезобетонных конструкций, зданий и сооружений, работающих в условиях как элементарного, так и сложного деформирования. В этой связи для образцов из керамзитобетона классов 8/10...25/30 были определены следующие характеристики: кубиковая и призмная прочности, модули продольных и поперечных деформаций, модуль сдвига, объемные деформации, коэффициент Пуассона, пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона: ГОСТ 24452-80 / Госкомитет СССР по делам строительства. – М., 1981. – 20 с.
2. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов / РУП «Институт БелНИИС». – Минск, 2013. – 38 с.
3. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии / С.Д. Семенюк // Вестн. БГТУ. Строительство и архитектура. – 2001. – № 1. – С. 40–44.
4. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании / С.Д. Семенюк. – Могилёв: Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.

Поступила 13.11.2015

S. SEMENIUK, I. MELYANTSOVA, A. PODGOLIN

*The results of experimental and theoretical studies of the strength and deformation properties of light concrete classes CL 8/10, CL 10/12.5, CL 16/20 and CL 25/30 on the basis of expanded clay gravel plant in Belarus with short-term central compression. Identified cube and prism strength, found the modules of longitudinal and transverse strain, shear modulus, limits of concrete microcracking formation.*

УДК 666.973.2:666.972.1

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВА КОСТРОСОЛОМЕННЫХ ПЛИТ****Н.В. ДАВЫДЕНКО; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)**

*Рассмотрены возможные области использования соломы и костры льна, включая строительство. Обосновано рациональное применение соломы и костры льна в качестве легких заполнителей для теплоизоляционных материалов. Представлены физико-механические характеристики костросоломенных плит, а также результаты испытаний на горючесть, дымообразующую способность и соответствие санитарно-гигиеническим нормам. Приведено описание схемы технологической линии по производству костросоломенных плит.*

**Введение.** Вовлечение в производство отходов и получение из них новых видов изделий – одно из главных направлений в промышленности строительных материалов. Расширить область использования в строительстве растительных отходов представляется возможным путем получения эффективных теплоизоляционных материалов. В настоящее время в странах Европы и России особое внимание в технологиях получения теплоизоляционных материалов уделяется использованию отходов растительного происхождения. Результаты практических экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой эффективности применения отходов растениеводства как сырья для получения теплоизоляционных материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками. Таким сырьем в полной мере могут являться отходы, образующиеся после сбора и переработки урожая зерновых культур, льна, семян подсолнечника, хлопка и т.д.

В производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь растениеводство, включая выращивание зерновых культур и льна, занимает существенный сегмент. По данным статистического ежегодника [1] в Беларуси посевные площади зерновых культур составляют около 2 млн. гектаров, льна-долгунца – 70 тыс. гектаров. В России посевные площади льна-долгунца занимают около 110 тыс. гектаров, а зерновых культур – 40 млн. гектаров [2].

При переработке тресты на льноперерабатывающих заводах образуется порядка 110 тыс. тонн костры ежегодно. Благодаря особенностям физического строения и химического состава льняной костры сырьевой продукт легко перерабатывать для изготовления различных материалов, в том числе и для строительной отрасли. Химический состав *костры льна* по основным компонентам, включая лигнин и целлюлозу, аналогичен древесине [3], что объясняет высокую адгезию с клеевыми составами на основе смол. Основная фракция частиц 5...20 мм позволяет использовать костру для изготовления композитной фанеры и древесно-стружечных плит, а при высоком давлении формования и плит без вяжущего компонента. Количество целлюлозы в костре льна достигает 64%, тогда как в древесине лиственных пород её содержание колеблется в пределах 47%, в хвойных породах – до 58% [4]; сахаросодержащих соединений содержится меньше, чем в древесине, что делает возможным использование костры для производства строительных материалов на минеральных вяжущих, включая цемент. В ряде случаев костра льна позволяет заменить древесное сырье и получить плиты или блоки с более высокими физико-механическими характеристиками. Физико-химическое строение дает возможность использовать костру в составах древесно-полимерных композитов в производстве деталей в автомобилестроении и конструктивных элементов [5]. Костра льна может использоваться как топливо для специальных топков с полным сгоранием или с образованием золы для удобрения почвы. Под высоким давлением из костры изготавливают топливные брикеты или пеллеты как твердое топливо для обогрева жилых домов и производственных зданий.

*Солома зерновых культур* по объемам значительно превосходит получаемое количество костры льна. Большинство сельхозпредприятий солома заготавливается в качестве добавки к кормам, для чего предварительно измельчается, а также как подстилочный слой для скота на сельскохозяйственных фермах. В последнее время широко применяется метод резки соломы непосредственно на поле с прицепными или навесными соломорезками с одновременным разбрасыванием измельченной соломы по полю в качестве органического удобрения почвы. Но такой способ эффективного применения соломы является весьма сомнительным, так как вместе с соломой перерабатываются сорняки и попадают в землю при перепашке, что приводит к дополнительному засорению почвы. Солома ячменная – одна из лучших в кормовом отношении, хорошо поедается скотом и имеет относительно высокую питательность. Овсяная солома по питательности уступает ячменной. Гречишная солома не уступает соломе овса, но по кормовым достоинствам – ниже. Рисовую солому, предварительно обработанную щелочными химическими препаратами, также используют в качестве энергетического материала для корма скота [6].

Разработаны и применяются технологии по использованию соломы в качестве топлива. Сжигание тюкованной соломы в специальных топках нашло свое применение в ряде стран [7]. Однако данный способ утилизации имеет существенные недостатки, такие как: дороговизна установок для сжигания; невысокий КПД по причине низкой плотности и высокой влажности сжигаемого сырья; неудобство применения ввиду крупных габаритов топлива, доставки потребителю, а также хранения в больших объемах.

В Республике Беларусь *соломенное жилье* начали возводить с 1996 года. Первый дом появился в деревне Занарочь Мядельского района. Позже подобные дома построили в деревнях Гомельской и Минской областей. Ведущим специалистом, положившим начало строительству домов из соломенных блоков в Беларуси, считается Е.И. Широков. По результатам практических наработок автором в работе [8] предложена технология поэтапного возведения домов с ограждающими конструкциями из соломенных блоков.

При строительстве домов из соломенных блоков существует два конструктивных решения. Наиболее распространенным вариантом является конструкция здания из несущего деревянного каркаса с заполнением соломенными блоками наружных стеновых проемов. Второй вариант предусматривает использование соломенных блоков в качестве сборных элементов несущих стен. Блоки укладываются с перевязкой швов, как и в кирпичной кладке, а для дополнительной жесткости и устойчивости стен в блоки вертикально вбивают деревянные колья. При устройстве стропильной системы по верху стены предварительно укладывают распределительные балки [8].

Литовской компанией «ЕсоСосоп» предложено новое техническое решение в строительстве из соломы – возведение домов с использованием соломенных щитов [9]. Эта уникальная технология производства соломенных щитов не имеет аналогов в мире. Особая конструкция щитов позволяет соединять их без использования специальных инструментов. При этом одна соломенная сторона щита примыкает к другой соломенной стороне, что полностью предотвращает образование «мостиков» холода.

**Основная часть.** Проанализировав опыт применения в строительстве костры льна и соломы, исследовав микроструктуру стеблей растениеводческих культур и выполнив комплекс испытаний, предложено эффективное решение по утилизации костры льна и дробленой соломы в виде композитного заполнителя для изготовления костросоломенных теплоизоляционных плит.

По результатам комплекса проведенных экспериментальных исследований определены: необходимый расход вяжущего в количестве 1...1,7 массовых долей; расход соломы – 0,5...0,7 массовых долей; содержание костры льна составляет 0,3...0,5 массовых долей.

Основные показатели костросоломенных плит: средняя плотность 220...250 кг/м<sup>3</sup>; прочность на сжатие при 10% деформации 0,65...0,8 МПа; предел прочности при изгибе 1,0...1,2 МПа; коэффициент теплопроводности в сухом состоянии 0,046...0,055 Вт/(м·°С).

Дополнительно определена сорбционная влажность теплоизоляционного материала на основе смеси соломы с кострой льна, составляющая 10...20 % при относительной влажности воздуха 60...80 %. Коэффициент паропроницаемости костросоломенных плит колеблется в пределах 0,31...0,47 мг/(м·ч·Па).

Полученные физико-механические характеристики достигаются благодаря особенностям микроструктуры костры и соломы, а также за счет формирования эффективной структурной системы «каркас в каркасе» при изготовлении плит.

При разработке технических условий на утеплитель испытания на горючесть и дымообразующую способность костросоломенных плит проводили в НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси. По результатам испытаний в соответствии с протоколом № 04-52/1833П «НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси» костросоломенные плиты относятся к группе горючести Г1 (слабо горючие) по ГОСТ 30244. Согласно протоколу испытаний № 04-52/1832П «НИИ ПБ и ЧС МЧС Беларуси» костросоломенные плиты соответствуют группе материалов с малой дымообразующей способностью Д1 по ГОСТ 12.1.044.

Костросоломенные плиты прошли санитарно-гигиеническую экспертизу в Республиканском центре гигиены и эпидемиологии. В соответствии с протоколом № 8409/270 по результатам лабораторных исследований санитарно-гигиенической экспертизы костросоломенные плиты не обладают раздражающим действием на кожные покровы лабораторных животных. Миграция химических веществ (формальдегида) из плиты в контактирующую среду (воздух) не превышает допустимых количеств, регламентируемых СанПиН 2.1.2.12-25; по одориметрическим показателям исследований соответствует требованиям СанПиН 2.1.2.12-25; по эффективной удельной активности естественных радионуклидов не превышает допустимого уровня, регламентируемого НРБ-2000.

Основываясь на полученных экспериментальных данных физико-механических характеристик костросоломенного утеплителя, а также результатах испытаний пожарной и санитарно-гигиенической экспертизы разработаны технические условия ТУ ВУ 300220696.060-2011 «Плиты костросоломенные строительные теплоизоляционные», позволяющие производить и применять теплоизоляционный материал в конструкциях зданий и сооружений различного назначения.

Изучив технологии сбора урожая зерновых и производства жидкого стекла, механизм структурообразования утеплителя, разработано техническое решение по организации производства костросоломенных плит в виде схемы технологической линии (рис. 1) с описанием последовательно выполняемых производственных операций.

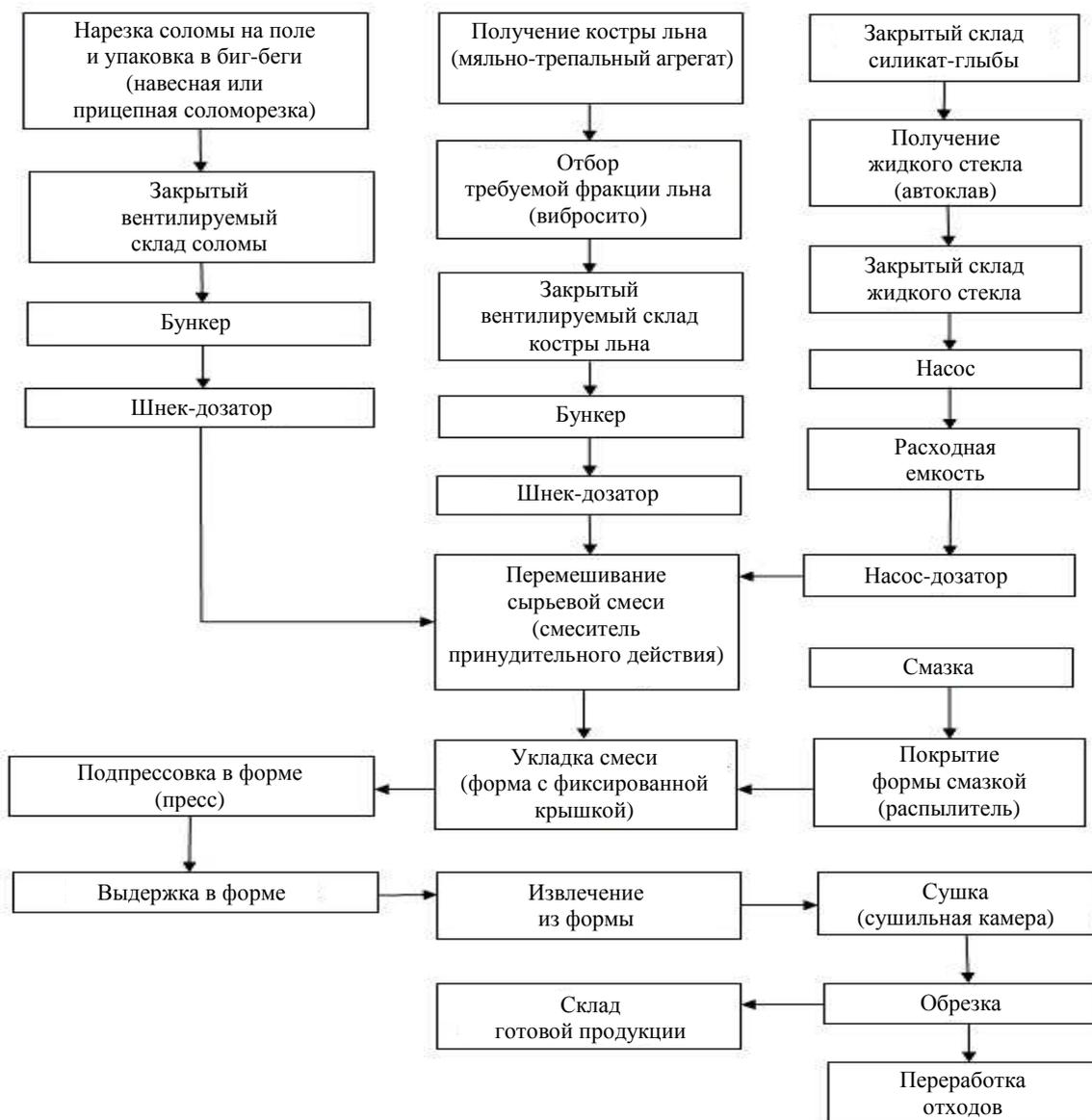


Рисунок 1 – Технологическая схема производства костросоломенных плит

На подготовительном этапе заготовки сырья ввиду необходимости сохранения целостности трубки ржаной соломы нарезку соломы фракцией 20...40 мм производят непосредственно на поле с использованием навесной соломорезки на комбайне или прицепной соломорезки к трактору. Нарезанная солома упаковывается в сетчатые биг-беги и транспортируется на склад предприятия.

Для хранения рассыпной соломы в биг-бегах используют закрытые неотапливаемые складские помещения с активной системой вентиляции. В летне-осенний период возможно хранение соломы под навесом. Со склада солома подается по транспортеру в бункер промежуточного хранения объемом 4...5 м<sup>3</sup>. Затем из бункера по винтовому конвейеру с помощью шнека через дозатор подается в смеситель принудительного действия.

После получения костры льна производится отбор необходимой фракции не более 5 мм путем прохождения через вибросито. Костра требуемого размера по транспортеру подается на закрытый неотапливаемый склад с активной системой вентиляции. Следующие технологические операции с кострой льна такие же, как и для соломы.

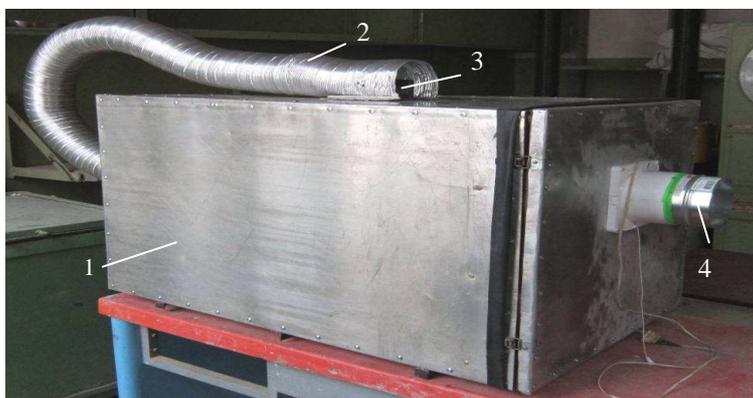
С точки зрения экономической выгоды наиболее приемлемым является производство жидкого стекла из силикат-глыбы непосредственно на предприятии, где предусматривается склад её хранения и организуется закрытый участок по производству жидкого стекла с применением автоклава. Силикат-глыба загружается в автоклав, в котором происходит варка жидкого стекла. Из автоклава жидкое стекло поступает в емкости для хранения. С помощью насоса жидкое стекло подается в расходную емкость объемом 1,5...2 м<sup>3</sup>, а затем через насос-дозатор впрыскивается через форсунки в смеситель, где уже находится смесь соломы и костры льна. При распылении вязущего происходит ворошение массы наполнителя для достижения равномерного распределения по поверхности частиц соломы и костры.

Из смесителя готовая смесь подается в форму. Для облегчения массы форма изготавливается из ламинированной влагостойкой фанеры или из твердого пластика. Форма имеет пригрузочную крышку с устройством для фиксации в заданном по толщине плиты положении. Предварительно перед формовкой внутренние грани формы смазывают машинным маслом с помощью распылителя для предотвращения адгезии с котросоломенными плитами и устанавливают короб-насадку для обеспечения подачи всей массы за один прием. Заполнение формы сырьевой массой производится равномерно по всему объему с одинаковой толщиной. Форму с композитной смесью перемещают на площадку пресса. Затем устанавливают пригрузочную крышку и подпрессовывают смесь до заданной толщины, фиксируют крышку в требуемом положении и снимают короб-насадку.

Композитная масса в форме выдерживается 5...6 часов, после чего производят распалубку формы и влажная котросоломенная плита помещается в сушильную камеру. Сушка производится в камере либо за счет обдува теплым воздухом при температуре 80...110 °С (6...8 часов), либо с использованием СВЧ-нагрева (30...40 минут) в зависимости от размера плит.

При сушке на этапе длительного прогрева плит в камере горячим воздухом в результате постепенного нагрева массива высока вероятность появления внутренних напряжений поверхностных и внутренних областей, что может вызвать нарушение и ослабление структуры утеплителя. Сохранение структуры возможно при нагреве плит за счет сверхчастотных электромагнитных колебаний, обеспечивающих быстрый прогрев по всему объему материала. Применение для сушки плит СВЧ-нагрева обеспечивает положительные градиенты температуры, давления и влажности. Внутри материала данные показатели выше, чем на поверхности, что обуславливает быструю миграцию влаги из структурной толщи на наружные грани плиты [10].

В процессе проведения экспериментальных исследований, связанных с разработкой котросоломенных плит, разработана конструкция камеры СВЧ-сушки (рис. 2).



1 – камера; 2 – воздуховод; 3 – магнетрон; 4 – осевой вентилятор

Рисунок 2 – Экспериментальная камера СВЧ-сушки для теплоизоляционных плит

Реализованное конструктивное решение камеры СВЧ-сушки позволяет исключить возможность образования конденсата путем удаления водяных паров, образующихся при интенсивном разогреве плит, с помощью осевого вентилятора, расположенного на двери камеры. При включении вентилятора, удаляющего влажный воздух, внутри камеры создается разрежение, за счет чего нагретый от магнетрона воздух подается по воздуховоду в СВЧ-камеру. Магнетрон располагается на входе в воздуховод. Приток более теплого воздуха (24...26 °С) способствует снижению теплопотерь при разогреве плиты и сокращает время сушки теплоизоляционных плит на 5 минут по сравнению с подачей воздуха температурой 18...20 °С, снижая тем самым расход потребляемой электроэнергии. СВЧ-нагрев является более эффективным способом высушивания плит, но при этом следует учитывать вредное воздействие СВЧ-волн на здоровье людей и соблюдать соответствующие меры безопасности при включении СВЧ-камеры. После сушки выполняется обрезка плит и теплоизоляционный материал поступает на склад готовой продукции.

Разобранные формы чистят, собирают, смазывают и возвращают на формовочный участок. Технологическое оборудование в конце каждой смены промывают для удаления остатков наполнителей и вяжущего. Отходы, образующиеся после обрезки плит, собираются в отдельную емкость, а затем повторно используются в технологическом процессе.

**Заключение.** Разработанная технологическая линия позволит выпускать костросоломенные плиты стоимостью за 1 м<sup>3</sup> на 15...20 % ниже, чем производимые в настоящее время плиты из экструдированного пенополистирола или жесткие минераловатные плиты. Следует также учитывать, что костросоломенные плиты по сравнению с существующими аналогами являются экологически чистым и, соответственно, безопасным для здоровья людей теплоизоляционным материалом, производимым из постоянно возобновляемых сырьевых ресурсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический ежегодник 2013. – Минск: Национальный статистический комитет Респ. Беларусь, 2013. – 578 с.
2. Объединенная зерновая компания [Электронный ресурс]. – М.: ОАО Объединенная зерновая компания. – 2013. – Режим доступа: [http://www.oaoozk.com/images/data/gallery/12\\_6026\\_analitika.pdf](http://www.oaoozk.com/images/data/gallery/12_6026_analitika.pdf). – Дата доступа: 31.03.2015.
3. Суслов, Н.Н. Проектирование предприятий первичной обработки лубяных волокон / Н.Н. Суслов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 248 с.
4. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б.Н. Уголев. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 386 с.
5. Харатишвили, И.А. Прогрессивные строительные материалы / И.А. Харатишвили, И.Х. Наназашвили. – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.
6. Мишин, М.М. Совершенствование технологии уборки незерновой части урожая с разработкой режимов и параметров установки для изготовления утеплительных плит: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.М. Мишин. – Мичуринск, 2004. – 137 с.
7. Фирма ЕКО – Holz und Pellethandel GmbH была зарегистрирована в 2007 году в г. Карслуэ [Электронный ресурс]: сайт фирмы ЕКО – Holz und Pellethandel GmbH. – Режим доступа: <http://www.eko-pellethandel.de>. – Дата доступа: 14.04.2014.
8. Широков, Е.И. Экотехнология биопозитивных ограждающих конструкций из соломенных блоков в Беларуси: в 2 ч. / Е.И. Широков. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. – Ч. 1: Экодома из соломы: технология строительства. – 40 с.
9. The Ecosocoon straw panel technology is unique, unmatched in the world [Электронный ресурс]: сайт Ecosocoon. – Режим доступа: <http://ecosocoon.lt/english>. – Дата доступа: 02.02.2015.
10. Петров, А.Н. Теплоизоляционные материалы на основе соломы и неорганических связующих: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.Н. Петров. – Казань, 1998. – 178 с.

Поступила 03.12.2015

#### OPERATIONAL CHARACTERISTICS AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF STRAW-BOON PLATES MANUFACTURING

*N. DAVYDENKO, A. BAKATOVICH*

*Potential areas of usage of straw and boon of flax, including construction have been observed. Rational application of straw and boon of flax as lightweight aggregates for heat-insulating materials has been grounded. Physical-mechanical features of straw-boon plates as well as the results of burning tests, smoke-forming power and satisfying sanitary and hygienic standards are presented. Step-by-step description of the scheme of manufacturing line of straw-boon plates.*

УДК 666.973.2:666.97.031

**АНАЛИЗ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЛОКОВ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО АРБОЛИТА  
В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА****канд. техн. наук, доц. В.В. БОЗЫЛЕВ; А.Н. ЯГУБКИН  
(Полоцкий государственный университет)**

*Демонстрируется разработанное в Полоцком государственном университете инновационное решение – способ направленной укладки заполнителя, позволяющий увеличить прочность изделий на 70%, снизить их теплопроводность на 20%, и добавка-модификатор арболитовой смеси, позволяющая получить изделия с более низкой эксплуатационной влажностью. Представлено его практическое внедрение в производство модифицированного арболита по технологии колебательного уплотнения, которое успешно освоено на предприятии ООО «ЭкономЭнергоРесурс». В соответствии с действующими требованиями по организации выпуска новых видов строительных материалов и конструкций, особенности производства блоков из модифицированного арболита, полученных по технологии колебательного уплотнения, должны быть проработаны на научном уровне, чтобы затем стать основой технологического регламента.*

В настоящее время строящиеся в Республике Беларусь здания имеют существенные недостатки: в домах, возводимых из железобетонных панелей, из-за недостаточной влажности в помещениях у жителей обостряются астматические заболевания; в домах со стенами из ячеистых газосиликатных блоков наблюдается плесень, грибок на стенах, что приводит к аллергическим заболеваниям.

В условиях рыночной экономики стеновые материалы должны отвечать новым современным требованиям по созданию благоприятного микроклимата в жилых помещениях, стремясь к признанному эталону – стенам, изготовленным из натурального дерева. Выполнить комплекс поставленных требований может новый вид арболита, а также инновационные решения, разработанные в Полоцком государственном университете, такие как способ направленной укладки заполнителя, обеспечивающий увеличение прочности изделий на 70% и снижение теплопроводности на 20%, и добавка-модификатор, позволяющая получить изделия с более низкой эксплуатационной влажностью.

Аналоги арболита широко используются в Австрии, Великобритании, Германии, Голландии, России, Словакии, США, Японии и других странах.

**Основная часть.** В соответствии с действующими требованиями по организации выпуска новых видов строительных материалов и конструкций особенности производства блоков из модифицированного арболита, полученных по технологии колебательного уплотнения, определяют необходимость научной проработки, чтобы затем стать основой технологического регламента.

Материалы, используемые для производства блоков, должны удовлетворять требованиям действующих нормативно-технических документов и относиться к числу разрешенных Министерством здравоохранения Республики Беларусь и ГУВПС МВД Республики Беларусь.

В качестве вяжущего необходимо применять портландцемент по ГОСТ 10178 [1]. В качестве органических заполнителей должны применяться измельченная древесина из отходов лесозаготовок, лесопиления и деревообработки, соответствующие требованиям ГОСТ 19222 [2]. Химические добавки применяются в соответствии с требованиями ГОСТ 19222 [2], КХД1 [3]. Вода должна соответствовать требованиям СТБ 1114 [4].

Древесный заполнитель со склада к месту дозирования следует транспортировать ленточными транспортерами, скиповыми устройствами, пневмотранспортом и другими средствами, исключая его загрязнение. Древесный заполнитель в момент подачи на дозирование должен иметь положительную температуру. В зимнее время допускается замачивание в подогретой до 70 °С воде. Длительность замачивания древесного заполнителя назначается на основании результатов лабораторных испытаний и должна составлять не менее 15 минут. Арболитовая смесь изготавливается и транспортируется с использованием оборудования, применяемого на заводах сборного железобетона.

Древесный заполнитель дозируется объемно-весовым способом с последующей корректировкой состава смеси арболита по контролю насыпной плотности заполнителя в весовом дозаторе. Вода к смеси-телю должна подаваться по трубопроводу с регулируемой подачей.

Добавка Арбел вводится на стадии приготовления цементного теста, что позволяет защитить цемент от агрессивного действия вредных веществ, выделяющихся из древесного заполнителя. Добавка вводится в виде 10 %-ного водного раствора вместе с водой затворения к цементу, затем на 2 этапе добавляется древесный заполнитель. Продолжительность перемешивания арболитовой смеси, считая с момента загрузки всех материалов в смеситель циклического действия и до начала её выгрузки, определяется опытным путем и должна составлять не менее 3 минут. Арболитовая смесь от смесителя к месту укладки

транспортируется бетонораздатчиками или другими транспортными средствами, исключаящими ее расслаивание и потерю составляющих. Высота падения арболитовой смеси при перегрузках не должна превышать 1 метра до верхней кромки приемного бункера.

Изделия из арболитовой смеси формируют в металлических формах, удовлетворяющих требованиям СТБ 1120-98 [5]. Перед формированием поддоны и бортоснастка должны быть тщательно очищены, формы собраны и смазаны. В зимнее время формы должны иметь положительную температуру, но не более 40 °С.

*При закладке* арболитовой смеси в формы необходимо соблюдать следующие требования:

- время от момента выгрузки из смесителя до укладки должно быть не более 20 минут;
- применять специальные бетоноукладчики и другие механизмы с рабочими органами, обеспечивающими равномерное распределение смеси по всей площади формы;
- арболитовую смесь укладывать без перерывов.

*При уплотнении* арболитовых смесей необходимо:

- обеспечивать расчетное уплотнение смеси по всему объему конструкции;
- не допускать расслоения арболитовой смеси в верхнем слое конструкции, а также оседания цементного теста в нижнем слое;
- добиваться равномерной укладки арболитовой смеси, соблюдая горизонтальность уложенных слоев;
- не допускать вытекания цементного теста из формы.

*Колебательное уплотнение* смеси должно осуществляться в следующей последовательности:

- в форму укладывается бетонная смесь;
- включается двигатель, и тележка с формой совершает горизонтальные колебания;
- двигатель выключается, когда смесь займёт горизонтальное положение и заполнит углы формы;
- включается вибратор и производится вибрирование с пригрузом.

Пригруз назначается таким образом, чтобы обеспечить формирование верхнего слоя блока и не нарушить однородность плотности по высоте. Масса пригруза, равная 6 кг на 1 блок (0,08 м<sup>2</sup>), установлена опытным путём.

Отформованные конструкции из арболита должны твердеть в условиях, обеспечивающих достижение арболитом распалубочной или отпускной прочности в наиболее короткие сроки при соблюдении требований по экономии цемента и качеству готовых конструкций.

*Твердение конструкций из арболита* осуществляется при соблюдении определенных условий следующими способами:

- в естественных условиях при температуре воздуха не ниже 15 °С и относительной влажности воздуха 60...80 %;
- тепловой обработкой в камерах при температуре не более 55 °С и относительной влажности воздуха 50...60 %;
- электропрогревом при температуре не более 55 °С.

После приобретения арболитом прочности при сжатии, равной 50 % проектной, но не менее 0,5 МПа, конструкции распалубиваются и хранятся на крытом складе готовой продукции до приобретения отпускной прочности или прочности арболита при сжатии, соответствующей его классу.

В зимних условиях конструкции из арболита после распалубки хранят в закрытом помещении с температурой не ниже 15 °С также до приобретения отпускной прочности или прочности арболита при сжатии, соответствующей его классу.

Для контроля качества основных технологических показателей определяется соответствие показателей качества исходных материалов, арболитовой смеси, готовых конструкций из него и параметров технологических режимов производства нормируемым показателям. Значения показателей должны быть указаны в стандартах или технических условиях на конструкции конкретных видов, или в требованиях технологической документации. Показатели устанавливаются по данным входного, операционного и приемочного контроля в соответствии с требованиями ГОСТ 13015.1 [6].

Номенклатура показателей качества конструкций и параметры технологических режимов, подвергаемые входному, операционному и приёмочному контролю, принимаются по ГОСТ 13015.1 [6].

Следует определять качество материалов, используемых для изготовления арболита: цемента – по ГОСТ 310.1, ГОСТ 310.3, ГОСТ 310.4 [7–9]; древесной дробленки – по ГОСТ 19222 [2]; химических добавок – по стандартам или техническим условиям на данный вид химической добавки.

Контроль приготовления арболитовой смеси и проверка её качества производится путём отбора проб из арболита каждого класса не реже двух раз в смену и испытаний их по СТБ 2140 [10] и ГОСТ 10180 [11]. Контроль прочности при сжатии и плотность арболита, а также контроль назначенного технологического режима выполняют ежемесячно для каждого класса арболита. Для этого изготавливают по режиму, принятому на производстве, три серии образцов, по три образца в каждой, размером 150×150×150 мм. Первую серию выдерживают в течение 28 суток. Две серии контрольных образцов должны твердеть по одинаковому с контролируемыми конструкциями режиму до момента определения отпускной прочно-

сти (7 суток), после чего образцы испытываются на сжатие с обмером и взвешиванием для определения плотности, высушиваются до постоянной массы для определения влажности по ГОСТ 12730.1 [12] и ГОСТ 12730.2 [13].

Через 28 суток на образцах первой и третьей серии определяют среднюю прочность при сжатии (единичное значение прочности) арболита, учитываемую при статистической обработке по пункту 1.7 ГОСТ 10180 [11], а плотность образцов – по ГОСТ 12730.1 [12].

Для уточнения распалубочной прочности арболита следует изготавливать и испытывать образцы в возрасте 1...3 суток. Средняя фактическая прочность (класс) и плотность арболита признается удовлетворяющей проектным требованиям, если прочность его не ниже требуемой, а плотность испытанных образцов не превышает проектное значение более чем на 5%. Отпускную прочность при сжатии раствора отделочных слоев проверяют на образцах размером 7×7×7 см в соответствии с ГОСТ 10180 [11]. Образцы для проверки класса бетона (раствора) отделочных слоев изготавливают один раз в сутки. Влажность арболита в конструкциях проверяют не менее одного раза в месяц по ГОСТ 19222 [2]. Плотность арболита в конструкциях контролируют путем взвешивания конструкций динамометром с обязательной проверкой фактической толщины отдельных слоев. Плотность арболита в конструкциях целесообразно проверять на конструкциях, в которых производится контроль отпускной влажности арболита.

Морозостойкость арболита следует определять по ГОСТ 10060.1 [14] перед началом производства изделий конкретного вида, а затем через каждые 3 месяца или при изменении технологии изготовления.

До начала производства конструкций, а также в сроки, указанные в стандартах и технических условиях на конкретные виды конструкций, следует проверять следующие показатели арболита: водопоглощение – по ГОСТ 12730.3 [15]; коэффициент теплопроводности – по СТБ 1618 [16].

Производство модифицированного арболита по технологии колебательного уплотнения успешно освоено в городе Молодечно на предприятии ООО «ЭкономЭнергоРесурс» (рис. 1).



а)

б)

**а – оборудование для изготовления арболитовой смеси; б – оборудование для формования блоков**

**Рисунок 1 – Линия по производству блоков из модифицированного арболита по технологии колебательного уплотнения (ООО «ЭкономЭнергоРесурс», г. Молодечно)**

Продукция ООО «ЭкономЭнергоРесурс» пользуется повышенным спросом по всей республике. Созданы специальные строительные бригады, специализирующиеся на арболите. Активно ведется строительство индивидуальных жилых домов (рис. 2).



**Рисунок 2 – Строительство индивидуальных жилых домов в Минском районе из модифицированного арболита (ООО «ЭкономЭнергоРесурс», г. Молодечно)**

**Заключение.** Результаты практического внедрения представленных инновационных решений указывают на эффективность проекта. Полученные результаты также возможно применять в практической деятельности проектных организаций, производителей строительных материалов. Основные теоретические и практические положения, разработанные в рамках технологии колебательного уплотнения модифицированного арболита, могут быть использованы и в учебном процессе строительных специальностей вузов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия: ГОСТ 10178-85 / М-во промышленности строительных материалов СССР. – Введ. 01.01.87. – М.: Стройиздат, 1987. – 9 с.
2. Арболит и изделия из него. Общие технические условия: ГОСТ 19222-84. – Введ. 01.01.85. – М.: Гос. комитет СССР по делам строительства: НИИЖБ Госстроя СССР, 1985. – 21 с.
3. Химические добавки для бетонов и строительных растворов. Каталог – КХД1-2007 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; сост. Н.С. Протько. – Минск: Белстройцентр, 2007. – 57 с.
4. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 1998. – 20 с.
5. Формы стальные для изготовления железобетонных изделий. Технические условия: СТБ 1120-98 / М-во промышленности строительных материалов СССР. – Введ. 01.06.99. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 1999. – 19 с.
6. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Приёмка: ГОСТ 13015.1-81. – Введ. 01.07.82. – М.: Стройиздат, 1987. – 21 с.
7. Цементы. Методы испытаний. Общие положения: ГОСТ 310.1-76 / М-во промышленности строительных материалов СССР. – Введ. 01.01.78. – М.: Стройиздат, 1977. – 3 с.
8. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема: ГОСТ 310.3-76. – Введ. 01.01.78. – М.: Стройиздат: М-во промышленности строительных материалов СССР, 1977. – 9 с.
9. Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии: ГОСТ 310.4-76. – Введ. 01.07.83. – М.: Стройиздат: М-во промышленности строительных материалов СССР, 1983. – 17 с.
10. Смеси арболитовые. Технические условия: СТБ 2140-2010. – Введ. 18.11.2010. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2011. – 6 с.
11. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012. – Введ. 14.04.15. – Минск: Госстандарт, 2015. – 33 с.
12. Бетоны. Методы определения плотности: ГОСТ 12730.1-78. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов: СССР, 1980. – 5 с.
13. Бетоны. Методы определения влажности: ГОСТ 12730.2-78. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов: СССР, 1980. – 3 с.
14. Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости: ГОСТ 10060.1-95. – Введ. 01.04.97. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: НИИЖБ Рос. Федерации, 1997. – 6 с.
15. Бетоны. Методы определения водопоглощения: ГОСТ 12730.3-78. – Введ. 01.01.80. – М.: Изд-во стандартов: СССР, 1980. – 3 с.
16. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме: СТБ 1618-2006. – Введ. 01.07.2006. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2006. – 12 с.

Поступила 02.12.2015

**ANALYSIS OF MANUFACTURING A BLOCK OF MODIFIED ARBOLIT  
IN CONDITIONS OF PILOT PRODUCTION**

**V. BOZYLEV, A. YAGUBKIN**

*Innovative solutions developed in Polotsk State University, are paving the way directed aggregate, which can increase the strength of the product by 70% and reduce their thermal conductivity by 20%; modifier additive wood-concrete mixture, which allows to obtain products with a low operational humidity. The main factor that confirms any innovative solution is a practical implementation. Production of modified arbolit technology vibrational packing was successfully launched in Molodechno the company OOO "EkonomEnergoResurs". In accordance with the applicable requirements for the organization of new types of building materials and structures, especially the production of modified blocks arbolit obtained vibrational packing technology should be worked out on a scientific level, to then form the basis of production schedules.*

УДК 691-419.8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ  
В ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ****канд. техн. наук Д.Н. ШАБАНОВ; С.А. ТЕРЕХОВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Анализируется метод получения композиционных материалов с использованием пултрузионной технологии для производства композитов на основе термопластичных полимеров, позволяющих получить гранулированные литьевые материалы и однонаправленные препреги, а также в сопряженном с пропиткой (одностадийном) процессе профильные, намоточные и иные изделия. Показаны важнейшие средства регулирования свойств полимерсодержащих материалов через целенаправленное изменение количества и качества непрерывного волокнистого наполнителя в полимерном связующем. Сделан вывод, что максимально достижимая плотность упаковки любого наполнителя в полимерном связующем зависит, прежде всего, от геометрических размеров и форм наполнителя. Создана математическая модель структуры непрерывных волокнистых наполнителей в полимерных связующих. Предложена технологическая модель изготовления однонаправленного волокнистого композита через 3D-печать, позволяющая создавать высококачественные композитные материалы.*

**Введение.** Основу практически всех процессов изготовления композитных материалов составляет процесс пропитки материала полимерным связующим. Пропитка стеклоровинга составом из смолы и отвердителя с учетом высокой вязкости пропитывающего состава – один из наиболее сложно реализуемых процессов пропитки. Известные технологии пропитки армирующего изделия вязким составом достаточно хорошо изучены [1], однако несмотря на это имеет место проблема – в структуре пропитываемого изделия могут оставаться пузырьки воздуха [2]. Неоднородность в виде включения пузырьков воздуха в пропитываемой структуре изделия нарушает монолитность композитного материала и влияет на эксплуатационные характеристики [3]. Таким образом, для дальнейшего совершенствования процесса пропитки необходимо обладать сведениями о структуре волокнистого наполнителя и характере распределения размеров пор в ней. Такие данные можно получить экспериментальными методами, но это весьма сложно и требует дорогостоящего оборудования. Поэтому был выбран другой подход, суть которого заключается в предварительном моделировании структуры материала [4], позволяющем изучить её на уровне волокон и разработать новые решения для усовершенствования процесса пропитки.

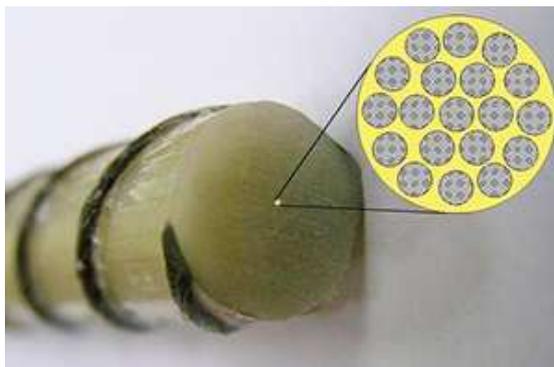
В настоящее время существует множество вариантов систем моделирования структуры материалов, но все они являются достаточно сложными и дорогостоящими. При работе с подобными системами моделирования пользователь не имеет возможности контролировать ход их работы. С учетом этого, а также с учетом отсутствия необходимости в модели высокой степени универсальности выдвинут способ моделирования, в модели которого главным является геометрический аспект структуры армирующих нитей. Модель построена для уровня межволоконных промежутков нити [5]. Используя принцип максимально плотной упаковки непрерывного волокнистого наполнителя в полимерном связующем, следует выяснить, какая из наиболее вероятных упаковок может быть реализована в плоскости. Для решения этого вопроса необходимо определить наиболее вероятные условия взаимного расположения и ориентации волокнистого наполнителя, наличие и число контактов между волокнами. По аналогии с плоской задачей, при пространственном расположении непрерывного волокнистого наполнителя одинакового размера за наиболее плотную упаковку без строго математического обоснования принимают гексагональную упаковку, для которой характерны 12 контактов непрерывного волокнистого наполнителя. Однако такая упаковка применяется редко. Самой рыхлой упаковкой непрерывного волокнистого наполнителя в пространственном расположении волокон будет упаковка, у которой имеется 4 контакта. Эта упаковка с относительно статической устойчивостью маловероятна. Следовательно, в данном случае число контактов может измениться от 4 до 12.

Рассмотренные существующие технологические линии позволяют получать однонаправленные волокнистые композитные материалы без их программного сопровождения, основанные на математическом моделировании, что не позволяет гарантировать качество. Чтобы исключить эти недостатки, нами разработана технологическая модель изготовления однонаправленного волокнистого композита через 3D-печать.

В строительстве всё большим спросом начинают пользоваться новые технологии и материалы. Один из таких материалов – композитная или стеклопластиковая арматура, применяемая для армирования бетонных изделий, а также в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Стеклопластиковая арматура считается современным практичным материалом, превосходящим по всем эксплуа-

тационным параметрам свой ближайший аналог – арматуру из стали. Использование стеклопластика позволяет оптимизировать любые ремонтные, монтажные и строительные работы без ущерба для качества и долговечности фундаментов и конструкций.

Существующая технология производства стеклопластиковой арматуры разделилась на 2 направления: производство арматуры с переменным (заданным диаметром) профиля и производство арматуры с посыпкой песком. Стеклопластиковая (композитная) арматура с определенным диаметром применяется везде стандартно, а с посыпкой песком – там, где необходимы особые условия для лучшего сцепления (адгезии) с бетоном. Стержень композитной арматуры (рис. 1) условно можно разделить на две части: *сердечник*, задающий основные прочностные характеристики арматуры, который представляет собой параллельные волокна, сцепленные связующим на основе эпоксидных смол; *внешний слой*, отвечающий за свойства сцепления с бетоном, – нанесённый на эпоксидное связующее песок, увеличивающий адгезию с бетоном, так как сцепление происходит по всей длине стержня.



**Рисунок 1 – Стеклопластиковая арматура, изготовленная по действующей технологии**

Существующие в настоящее время технологические линии по изготовлению стеклопластиковой арматуры имеют ряд недостатков: отсутствие возможности моделирования технологических процессов, использование многочисленного технического персонала, необходимость лабораторных исследований качества готовых изделий.

Решение этих проблем кроется в самой природе, а именно природе гусеницы-шелкопряда, железа которой состоит из двух отделов: в переднем образуется серицит, а в заднем – фиброин. Фиброин – это основной строительный материал кокона, а серицит – клей для скрепления нитей фиброина.

Анализ изложенной информации позволил предложить 3D-принтер, принцип работы которого основан на технологии 3D-печати волокнистым композитом. Данный принтер предназначен для создания стеклопластиковой арматуры периодического профиля. Предлагаемая нами модель 3D-принтера позволяет, пользуясь заранее создаваемой 3D-моделью, печатать арматуру любой номенклатуры.

Цель данной работы – возможность промышленного внедрения 3D-принтера для непрерывного совмещения армирующих волокон с полимерными связующими при печати композитных изделий при помощи волокон.

**Теоретические исследования.** Пропитка – один из важнейших процессов в технологии получения волокнистых композитов с полимерной матрицей. В работах, посвященных теории пропитки волокнистых систем, полимер рассматривается как ньютоновская жидкость, при этом не учитываются такие факторы, как нелинейность вязких свойств полимерных составов, геометрии порового пространства волокнистой системы, натяжения волокон в процессе пропитки. Сравнение значений коэффициентов проницаемости, рассчитанных на основе упрощенных моделей, с экспериментальными данными указывает на несовершенство применяемых подходов. В ряде работ (например, [6]) отмечен перколяционный характер течения полимерного связующего через пористые системы, однако специальные исследования этого механизма не проводились. В частности, не рассматривались случаи перколяции ньютоновских жидкостей через деформируемые волокнистые системы.

Для уменьшения толщины пропитываемого слоя и создания давления, необходимого для пропитки, чаще всего используют устройства с цилиндрическими отклоняющими элементами – штырями и роликами. Многочисленные патенты и экспериментальные данные свидетельствуют о необходимости таких устройств. В то же время конструктивно-технологические параметры рассчитываются на упрощенных моделях, не обладающих точностью, необходимой для объективной оценки потенциальных возможно-

стей устройств различного типа и для оптимизации режимов пропитки. Установлено, что исходное расположение цилиндрических элементов, моделирующих волокна, не оказывает существенного влияния на коэффициент проницаемости, если эти элементы неподвижны. Это свидетельствует о влиянии уплотнения модельной структуры на коэффициент проницаемости. Чем выше подвижность элементов, тем выше плотность и ниже проницаемость модели. С помощью компьютерной модели установлено, что увеличение коэффициента вязкости связующего на порядок приводит к увеличению продолжительности пропитки слоя почти на два порядка. Увеличение показателя степени в законе течения связующего также снижает проницаемость волокнистого слоя. Продолжительность пропитки слоя уменьшается с увеличением давления, но при этом увеличивается плотность упаковки волокон и снижаются эффективные коэффициенты проницаемости. При стохастическом расположении волокон под действием связующего формируются структуры, значительно отличающиеся от исходных. В частности, «языки», наблюдаемые в экспериментах с увеличенными моделями, и сильно уплотненные области (рис. 2). При малых натяжениях волокон под давлением связующего происходит почти полное «запирание» слоя. С увеличением натяжения волокон проницаемость волокнистого слоя возрастает, структура материала получается более однородной. При натяжениях, близких к разрывному усилию для волокон, скорость пропитки даже несколько больше, чем в случае системы с фиксированными волокнами [6].

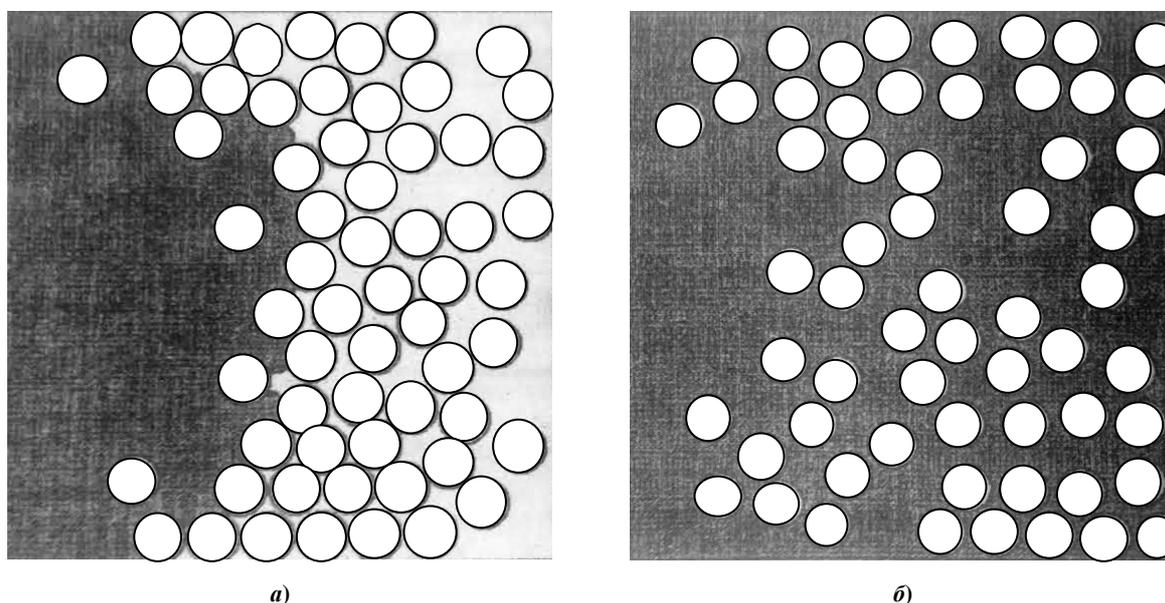


Рисунок 2 – Модельная структура натянутого слоя в начальной стадии (а) и после пропитки (б)

Как указывалось выше, пропитка непрерывного волокнистого наполнителя составом из смолы и отвердителя с учетом высокой вязкости пропитывающего состава является одним из наиболее сложно реализуемых процессов пропитки. Поэтому для пропитки непрерывного волокнистого наполнителя при изготовлении деталей из композитов применяют специальную вакуумную технологию, что обеспечивает относительно высокую скорость и степень полноты пропитки [6].

**Подходы к моделированию структуры непрерывных волокнистых композиционных материалов.** В работе [7] предложен подход, заключающийся в получении изображений внутренней структуры образца композиционного материала методом рентгеновской томографии с последующей их компьютерной обработкой. Это позволило вычислить геометрические характеристики исследуемого композиционного материала. Недостатком такого подхода является то, что для его реализации требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния непрерывного волокнистого наполнителя с учетом его поперечной деформации представлены в работе [8], в которой, однако, не ставилась задача моделирования на межволоконном уровне. Наиболее интересный подход к моделированию структуры композита представлен в работах группы «Композиционные материалы», созданной в Католическом университете города Лёвена (Бельгия) [9; 10]. Её разработки являются продолжением исследований автора работы [11]. Среда моделирования композитов, разработанных этой группой, имеет название «WiseTex» [4], демо-версия которой размещена на сайте [12]. Она содержит модель внутренней геометрии композита и описание волокон в структуре непрерывного

волокнистого наполнителя. К недостаткам среды моделирования WiseTex можно отнести отсутствие инструмента для оценки распределения межволоконных пор волокнистого наполнителя по размерам.

Принимая гипотезу, что участки поперечного сечения плоского волокнистого непрерывного наполнителя имеют схожие характеристики распределения межволоконного пространства, в плоскости сечения наполнителя все волокна отображаются в виде контуров их сечений, расположенных на некотором расстоянии друг от друга в области прямоугольной формы. Площадь всего прямоугольного участка, за вычетом суммарной площади сечений волокон, представляет собой срез межволоконного пространства.

Определим параметры структуры непрерывного волокнистого наполнителя по известной пористости. Эта задача заключается в том, чтобы найти межцентровые расстояния контуров сечения волокон по горизонтали и вертикали, соответствующие заданной пористости структуры нити, если известен радиус волокна. Введём обозначения параметров. Изменяемые параметры для заданного радиуса  $r$  – шаг по горизонтали  $m$  и шаг по вертикали  $h$ , при этом шаг по вертикали  $h$  должен быть выражен через шаг по горизонтали  $m$ . В итоге, варьируя шагом по горизонтали  $m$ , необходимо подобрать такое его значение, при котором пористость составит 50% [5].

Зададим систему координат, начало координат  $O$  которой совпадает с левым нижним углом сетки. Ось  $OX$  направлена горизонтально, а ось  $OY$  – вертикально. Рассмотрим участок сечения нити, на котором в регулярном шахматном порядке расположены контуры сечения волокон с межцентровым расстоянием  $3r$ , как это показано на рисунке 3.

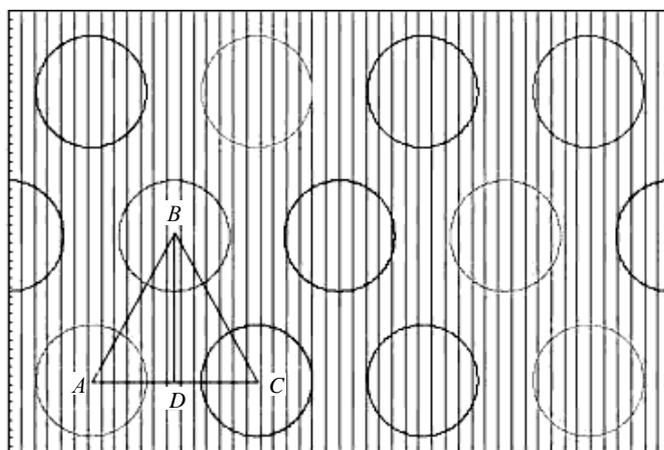


Рисунок 3 – Распределение контуров сечения волокон по исследуемому участку нити в регулярном шахматном порядке

Установим связь между величиной пористости и параметрами структуры волокнистого наполнителя. Такими параметрами являются радиус нити  $r$ , шаг расположения межцентровых расстояний в горизонтальном  $m$  и вертикальном  $h$  направлениях. Между последними двумя параметрами существует однозначная зависимость, если дополнительно выдвигается требование одинакового расстояния между центрами контуров сечения витков в любом направлении.

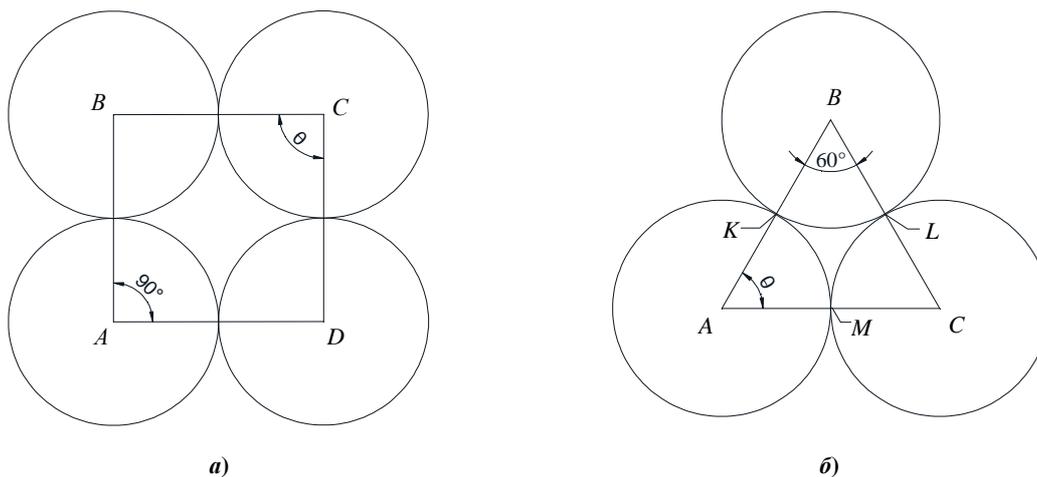
Для того чтобы установить эту связь, рассмотрим треугольник  $ABC$ , вершины которого совпадают с центрами окружностей, а стороны равны межцентровым расстояниям  $3r$ . Из анализа треугольника следует, что если шаг по горизонтали  $m = 3r$ , то шаг по вертикали  $h = BD = (\sqrt{3}/2)3r$  [5].

Одним из параметров пористой среды, образованных непрерывным волокнистым наполнителем и характеризующих ее способность пропускать через себя вязкие жидкости, является диаметр пор  $d_n$ .

Для получения размера пор с точки зрения математической модели рассмотрим непрерывный волокнистый наполнитель как фиктивную пористую среду, то есть будем считать, что формой этих волокон в плоскости является круг, размеры которого одинаковы для всех волокон.

Различные комбинации в расположении волокон фиктивной пористой среды находятся между двумя крайними конфигурациями, из которых одна соответствует наиболее свободному размещению волокон и, следовательно, максимальной пористости (рис. 4, а), а вторая – наиболее тесному их расположению и, соответственно, минимальной пористости (рис. 4, б).

При указанных крайних конфигурациях волокон пористость фиктивной пористой наиболее свободной и наиболее тесной среды  $m$  составляет соответственно 47,64 и 25,95%. Наименьшее сечение поры в фиктивной среде наблюдается в наиболее тесном размещении волокон при угле  $\theta = 60^\circ$  [13].



*a* – наиболее свободная; *б* – наиболее тесная

Рисунок 4 – Крайние конфигурации волокон фиктивной пористой среды [13]:

Найдём площадь  $F$  криволинейного треугольника  $KLM$ . Из построения (см. рис. 4) ясно, что  $AB = BC = AC = 2r$ , а площадь минимального сечения поры

$$f_n = F_{\Delta ABC} - F_{(\Delta AKM + \Delta BLK + \Delta CML)}. \quad (1)$$

Здесь

$$F_{\Delta ABC} = 1/2 AB \cdot AC \cdot \sin 60^\circ = r^2 \sqrt{3}. \quad (2)$$

Площадь  $(\Delta AKM + \Delta BLK + \Delta CML)$  представляет собой площадь полукруга, радиус которого  $r$ , следовательно

$$F_{(\Delta AKM + \Delta BLK + \Delta CML)} = \frac{\pi r^2}{2}. \quad (3)$$

Таким образом, площадь минимального сечения поры

$$f_n = r^2 \sqrt{3} - \pi r^2 / 2 = r^2 \left( \sqrt{3} - \frac{\pi}{2} \right) = 0,1613 r^2. \quad (4)$$

Заменяя сложное сечение поры на круглое, площадь которой равна площади её поперечного сечения (см. рис. 4), получим

$$\pi \Delta_n^2 / 4 = 0,1613 \pi D_\phi^2 / 4, \quad (5)$$

где  $\Delta_n$  – диаметр сечения условной цилиндрической поры;  $D_\phi$  – диаметр волокон фиктивной пористой среды.

Преобразовав выражение (5), найдем

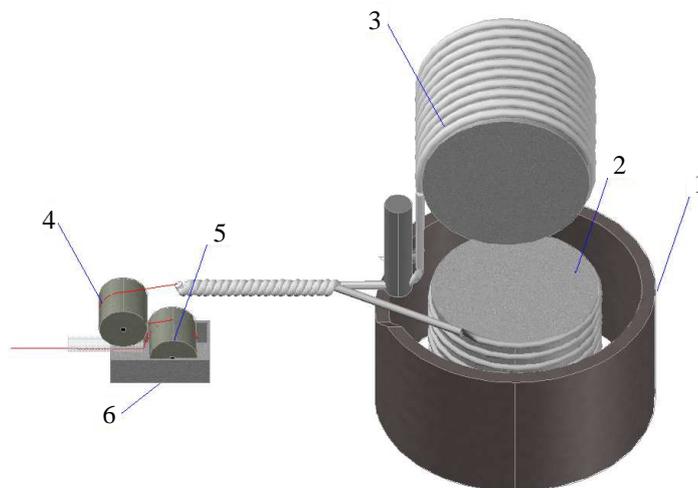
$$\Delta_n = 0,225 D_\phi.$$

Используя полученные данные, можно перейти к построению модели межволоконного порового пространства волоконного наполнителя с целью оценки распределения межволоконных пор по размерам. Пример построения такой модели приведен в [5].

С помощью построения модели межволоконного порового пространства с учетом случайных отклонений контуров сечения волокон в плоскости были определены геометрические параметры структуры нити, выраженные через единичный радиус волокна, и получена функция распределения межволоконных пор по размерам для плоского волокнистого наполнителя [5].

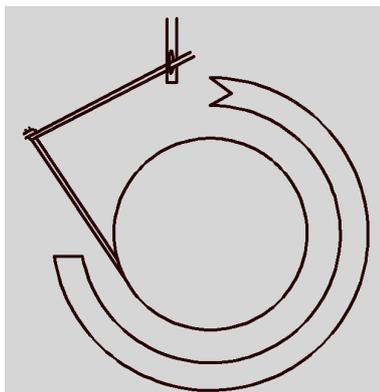
Известен 3D-принтер [14], печатающий хлопчатобумажными нитями, пропитанными светочувствительной смолой, которые проходят через принтер и, оказавшись на платформе для печати, мгновенно затвердевают под воздействием ультрафиолета.

Разработанная нами модель 3D-принтера представлена на рисунке 5.

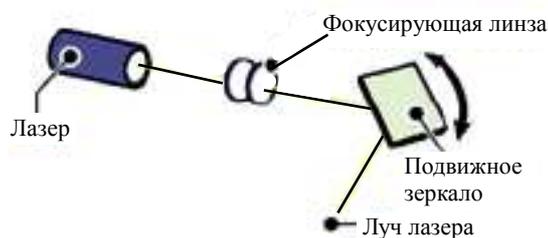


**Рисунок 5 – Модель 3D-принтера, печатающего волокнистым композитом**

3D-печать изделия происходит по следующей схеме: деталь 1 (рис. 6) скручивает нити с бобин 2 и 3. Нити проходят пористые валы 4 и 5, с помощью которых происходит пропитка изделия смолой\*. Излишек смолы стекает в лоток 6 с последующим отверждением при помощи устройства, представленного на рисунке 7.



**Рисунок 6 – Деталь, служащая для создания периодического профиля стеклопластиковой арматуры**



**Рисунок 7 – Устройство, предназначенное для отверждения пропитывающей смолы**

**Заключение.** В числе перспективных для широкого промышленного применения технологических схем непрерывного совмещения армирующих стекловолокон и полимерного связующего для изготовления композитных стержней периодического профиля исследованы технологические процессы пропитки однонаправленных волокнистых композиционных материалов, оптимизация процессов структурирования вязкоупругих твердых тел на основе математического моделирования. Подобные исследования обусловлены расширяющимися возможностями применения таких материалов в строительных изделиях и приобретают особенное значение с возрастающим применением в изделиях с нитями различного происхождения. Это указывает на необходимость накопления информации о деформационных и энергетических компонентах волокнистых композиционных материалов.

Поскольку математическое моделирование состояний изотропных твердых тел, к которым относятся и полимерные изделия, армированные однонаправленными стеклянными волокнами, строится на их реологических характеристиках, то этот материал описывается двумя реологическими

\* Технологический процесс пропитки заимствован из [6].

уравнениями: 1) для деформации объема – уравнение, общее для всех тел; 2) для формоизменения – уравнение, характерное для каждого тела в отдельности. Используя модель структуры однонаправленного волокнистого материала, можно косвенно оценить реологические характеристики этого материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский, В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский: – Киев: Наукова думка, 1983. – 144 с.
2. Сыс, В.В. Особенности пропитки арамидной ткани вязким составом при изготовлении деталей из композитного материала / В.В. Сыс, Ю.Н. Бардачев // Проблемы легкой и тяжелой промышленности Украины. – 2012. – № 2(20). – С. 74–78.
3. Ультразвуковая пропитка стеклотканей конструкций из стеклопластиков / П.Л. Городнищенский [и др.] // Материалы Всесоюзной акустической конф. – М., 1978. – С. 103–106.
4. Ломов, С.В. WiseTex – виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойства текстильных и полимерных композитов [Электронный ресурс] / С.В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. – 2006. – № 13. – Режим доступа: <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>. – Дата доступа: 12.11.2015.
5. Сыс, В.В. Оценка распределения межволоконных пор по размерам методом моделирования структуры нити / В.В. Сыс [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-raspredeleniya-mezhvolokonnyh-por-po-razmeram-metodom-modelirovaniya-struktury-niti>. – Дата доступа: 28.11.2015.
6. Кордикова, Е.И. Пропитка волокнистых материалов расплавами термопластичных полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.06 / Е.И. Кордикова; Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск, 2000. – 21 с.
7. Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration [Электронный ресурс] / G.L. Vignoles [et al.] // Carbon 2009, Biarritz: France. – Режим доступа: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>. – Дата доступа: 06.11.2015.
8. Сыс, В.Б. Развитие научных основ создания низко модульной технологии жидкостной обработки нитей в паковках: дис. ... д-ра техн. наук / В.Б. Сыс. – Херсон, 2008. – 328 л.
9. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites / S.V. Lomov [et al.] // Composites Science and Technology. – 2000. – Vol. 60. – P. 2083–2095.
10. Lomov, S.V. Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models / S.V. Lomov, G. Huysmans, I. Verpoest // Textile Research Journal. – 2001. – Vol. 71, № 6. – P. 534–543.
11. Ломов, С.В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Ломов. – СПб., 1995. – 486 л.
12. WiseTex suit demo version [Электронный ресурс] / KU Leuven, Belgium. – Режим доступа: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>. – Дата доступа: 05.11.2015.
13. Проценко, П.В. Вибронагнетательный способ раздельного бетонирования конструкций / П.В. Проценко. – М.: Стройиздат, 1978. – 71 с.
14. Студент (С. Моралес) сконструировал принтер, печатающий волокнистым композитом [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://3d-expo.ru/ru/student-skonstruiroval-printer-pechatayushchiy-voлокnistym-kompozitom>. – Дата доступа: 28.11.2015.

Поступила 03.12.2015

### MODELING THE STRUCTURE OF A CONTINUOUS FIBER FILLER IN THE POLYMER BINDER

*D. SHABANOV, S. TEREKHOV*

*In the article the method of producing composite materials using pultrusion technology to produce composites based on thermoplastic polymers that provide a granular molded materials and unidirectional prepregs as well as in the dual-impregnated (one-step) process profile, winding and other products is analyzed. The most important means of controlling the properties of polymer materials through targeted changes in the amount and quality of continuous fiber reinforcement in a polymer binder are showed. It is concluded that the maximum achievable packing density of the filler in any polymeric binder depends primarily on the dimensions and shapes of the filler. A mathematical model of the continuous fibrous fillers in polymer binders. A process of manufacturing a unidirectional fiber composite model by 3D-press, allowing to create high-quality composite materials.*

УДК 666.972.16

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ДЕЙСТВИЯ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК  
НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ****канд. техн. наук, доц. Ю.И. КИРЕЕВА; Т.И. ЕРМОЛАЕВА; К.А. КАСТЮРИНА  
(Полоцкий государственный университет)**

*Демонстрируются результаты исследования влияния химических добавок на свойства поверхности цементных зерен, пластичность водоцементных систем, структуру, прочность и коррозионную стойкость искусственного камня. Исследуется влияние добавок, которые широко применяют при монолитном и дорожном строительстве в летних (С-3) и зимних (поташ) условиях. Получены данные о различном действии добавок на пластичность смесей, структуру и свойства искусственного камня. Установлено, что добавка С-3 способствует разделению цементных зерен, увеличению пластичности водоцементных смесей и формированию плотной, прочной структуры; добавка поташа вызывает объединение цементных зерен, образование больших флоккул и, как следствие, пористую структуру, высокую проницаемость искусственного камня, которая снижает его коррозионную стойкость; применение поташа вместе с пластификатором улучшает свойства искусственного камня.*

В современном строительстве химические добавки являются полноправными эффективными компонентами цементных систем разной степени сложности (суспензии, растворные и бетонные смеси), позволяющими целенаправленно регулировать их свойства как на стадии приготовления и использования, так и на долговременный период эксплуатации полученных каменных материалов [1].

Результаты экспериментов ряда авторов свидетельствуют о том, что добавки вызывают существенные структурные изменения в цементном камне, влияют на процесс гидратации цемента, его прочность и долговечность [2–5]. Наиболее востребованными в технологии летнего бетонирования монолитных конструкций и в дорожном строительстве в связи с пониженной влажностью и повышенной температурой воздуха являются органические добавки-суперпластификаторы, в частности С-3, позволяющие не только повысить пластичность смеси и облегчить трудоемкость использования, но и продлить ее жизнеспособность, что особенно важно при больших площадях дорожного покрытия [6; 7].

Добавка С-3 – искусственно полученный продукт, состоящий из сульфированных меламиноформальдегидных смол, оптимальное количество ввода которого составляет 0,3...0,6% от массы цемента.

Применение неорганических добавок-антифризов позволяет вести аналогичные бетонные работы в зимний период при отрицательной температуре без дополнительного дорогостоящего обогрева. Установлено, что стоимость производства бетонных работ с противоморозными добавками по сравнению со стоимостью в летний период увеличивается на 8...12%, в то время как с применением электро- и паропрогрева на 20...40% [3].

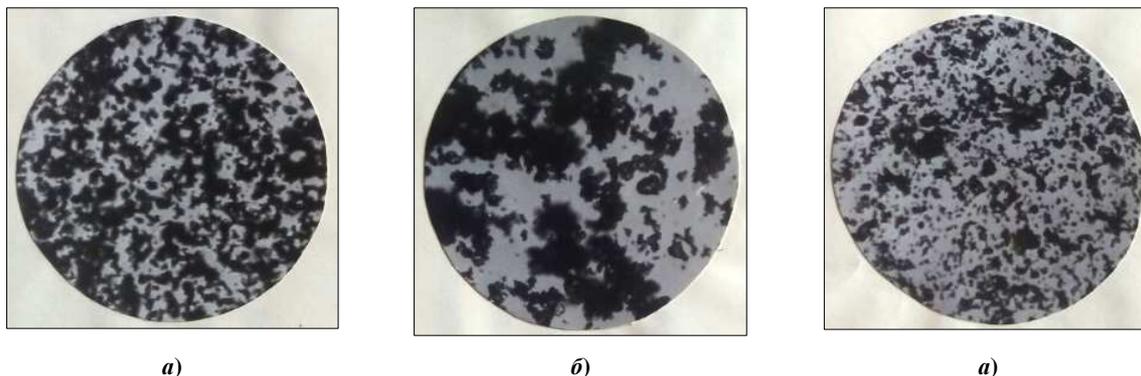
**Основная часть.** Наиболее эффективной добавкой на протяжении многих лет является поташ, снижающий температуру замерзания воды до минус 36 °С и не вызывающий (вследствие высокой щелочности среды) коррозию арматуры. Как показали работы ряда авторов [3–5], добавка поташа обеспечивает ускорение сроков схватывания смеси и формирование относительно дефектной структуры искусственного камня. Поэтому в представленной работе нами исследовалось влияние однокомпонентной добавки поташ и комплексной в сочетании с СДБ (сульфитно-дорожной бражкой) [8–10].

Температура замерзания зависит от природы ионов, находящихся в растворе, их заряда и способности к гидратации. Добавка, представляющая собой соль, попадая в воду, обладающую высокой диэлектрической постоянной, диссоциирует на ионы, которые, в свою очередь, влияют на структуру и свойства растворителя – воды. Это влияние заключается в том, что ионы, связывая молекулы воды, образуют гидратные оболочки, величина и прочность которых зависят от напряженности электрического поля и размера иона. Переводя часть воды из свободного состояния в связанное, они затрудняют выход воды в пар – ее испарение, снижают давление пара, зависящее по закону Рауля от концентрации и степени диссоциации растворенного вещества, и, как следствие, снижают температуру замерзания раствора [3].

Реологические свойства цементных систем зависят, прежде всего, от количества и вязкости цементного теста. При вводе гидрофильной добавки С-3 на поверхности цементных зерен образуется оболочка из мономолекулярных соединений, снижающих поверхностное натяжение воды на границе раздела «твердая фаза – жидкость» и внутреннее трение в цементно-водных системах. Вода, распределяясь по всей поверхности цементных зерен, вызывает их пептизацию и, как следствие, снижает вязкость цементного теста (рис. 1, табл. 1).

Разъединение цементных агрегатов приводит к увеличению удельной поверхности цемента, повышению седиментационной устойчивости системы, плотности формирующегося теста и, как следствие,

цементного камня, определяющего такие важные эксплуатационные свойства материала, как проницаемость, морозостойкость, коррозионная стойкость (при отсутствии химического взаимодействия).



а)

б)

а)

а – без добавки; б – 10% поташ; 3 – 10% поташ + 0,6% С-3

Рисунок 1 – Влияние добавок на флокуляцию цементных зерен

Таблица 1 – Влияние добавок на свойства цементных суспензий

Вид добавки	Количество добавки, % от цемента	Время оседания, мин	Плотность осадка, г/см <sup>3</sup>	Осадка конуса, см	Диаметр расплыва, см
Без добавки	–	18	2,84	0,95	4,8
С-3	0,3	360	3,79	5,25	9,1
	0,6	360	3,81	5,55	9,8
Поташ	5	10	2,32	0,36	4,0
	10	8	2,25	0,20	3,7
Поташ + СДБ	10 + 1	16	2,79	0,87	4,5

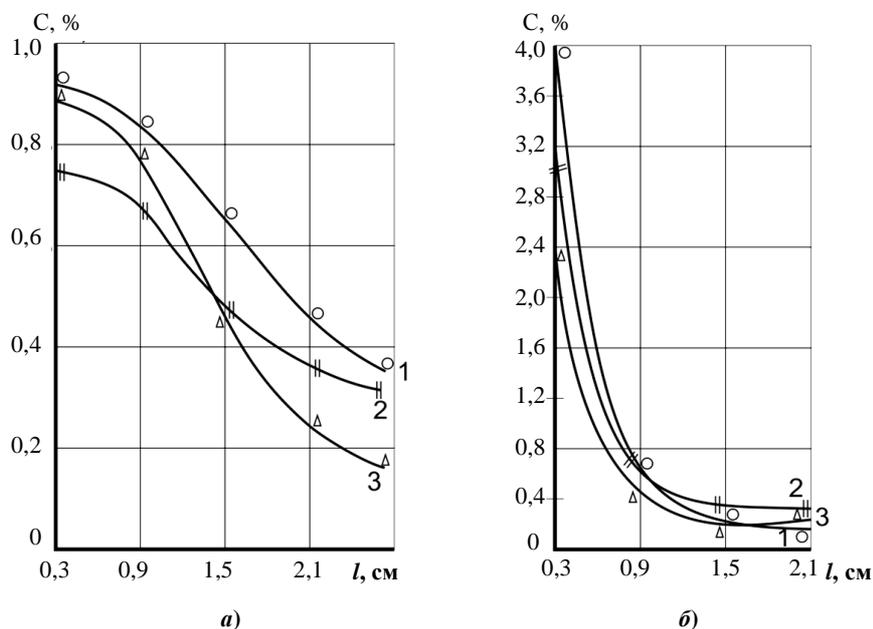
Наблюдаемая пептизация способствует увеличению химически активной площади поверхности цементных зерен, вследствие чего процесс гидратации и структурообразования в дальнейшем проходят интенсивнее, обеспечивая тем самым более высокую прочность по сравнению с аналогичным составом без добавки как в ранние сроки твердения, так и нормируемые 28 суток (табл. 2). Пластифицирующий эффект добавки усиливается с увеличением количества ее ввода, о чем свидетельствуют данные таблицы 1.

Таблица 2 – Влияние добавок на структуру и прочность цементного камня

Вид добавки	Количество добавки, % от цемента	Водопоглощение ( <i>m</i> ), %, за время			Предел прочности на сжатие, МПа, через (сутки)		
		15 мин	1 ч	24 ч	7	14	28
Без добавки	–	13,03	14,90	17,00	25,70	30,19	34,72
С-3	0,3	10,80	11,85	13,61	26,90	32,98	39,84
	0,6	10,05	11,15	13,11	27,09	33,79	43,32
Поташ	5	14,54	17,06	18,60	20,47	23,96	28,88
	10	14,95	17,78	18,91	17,98	20,29	25,21
Поташ + СДБ	10 + 1	13,1	14,40	16,82	24,40	28,90	30,40

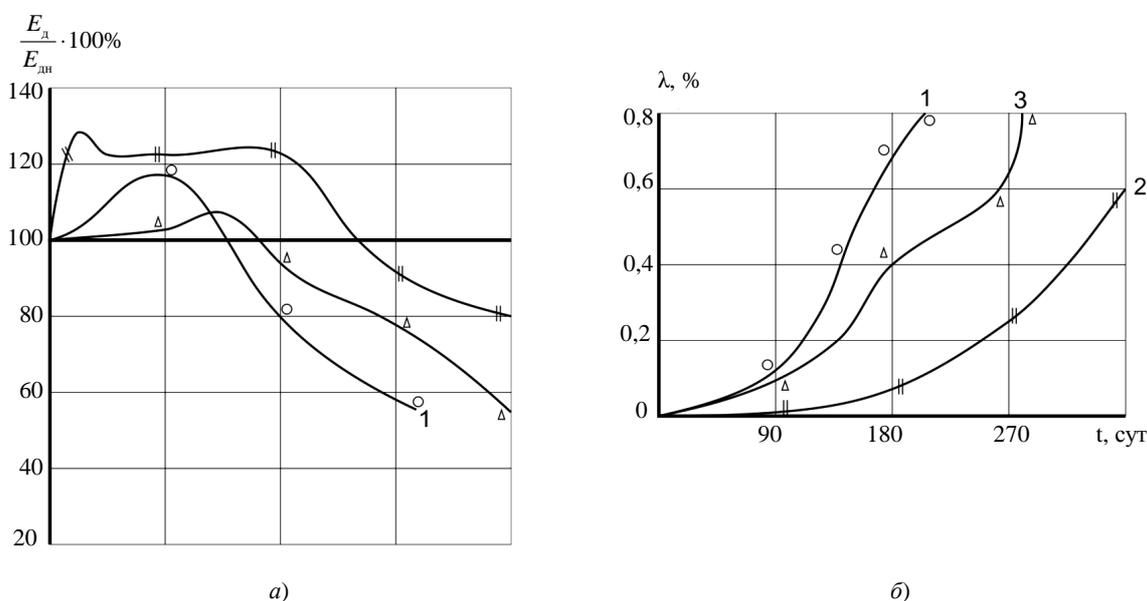
В растворе поташа повышение щелочности вызывает резкое снижение гидратации поверхности цементных зерен, усиливающееся при повышении концентрации, в результате происходит слипание цементных частиц в крупные агрегаты, коагуляция крупных флокулов размером до 300 мкм, быстрое беспорядочное их оседание под действием собственного веса и, как следствие, образование рыхлого, объемного осадка. Последнее приводит к формированию пористой структуры, повышению проницаемости и снижению коррозионной стойкости (рис. 2–5, табл. 1).

Влияние добавок на поверхностные свойства вяжущего изучали на цементных суспензиях состава Ц : Р = 1 : 5 по времени седиментации цементных зерен, плотности образованного осадка и с использованием поляризационного микроскопа в проходящем свете, степень увеличения  $\times 90$ .



1 –  $K_2CO_3$ ; 2 – без добавки; 3 –  $K_2CO_3$  + СДБ

Рисунок 2 – Диффузионная проницаемость ионов  $SO_4^{2-}$  (а),  $Cl^-$  (б) в цементно-песчаный раствор

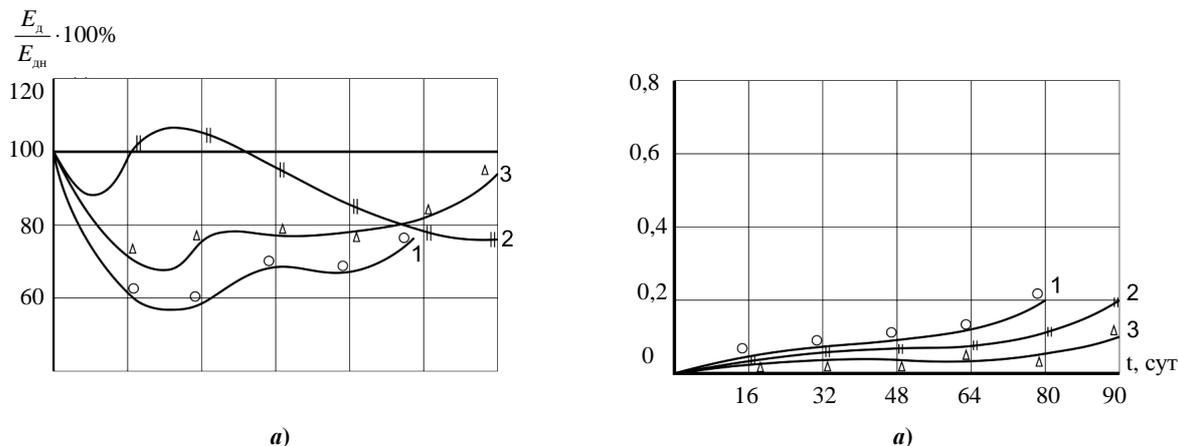


1 –  $K_2CO_3$ ; 2 – без добавки; 3 –  $K_2CO_3$  + СДБ в 10 %-ном растворе  $K_2SO_4$

Рисунок 3 – Изменение  $E_d$  (а) и деформаций бетонных образцов с добавками (б) в цементно-песчаный раствор

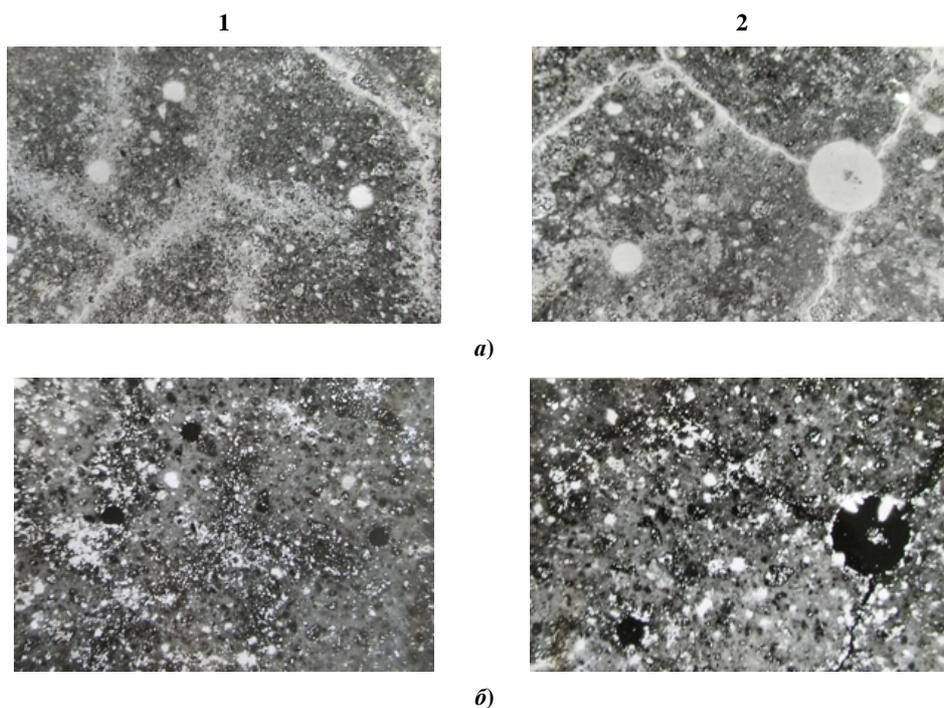
Влияние добавок на пластичность смеси оценивали с использованием стандартного мини-конуса ( $d_b = 2$  см,  $d_n = 4$  см,  $h = 6$  см) по осадке и расплыву цементного теста ( $B / Ц = 0,5$ ), а также осадке конуса из бетонной смеси (см. табл. 1). Для определения показателей макроструктуры цементного камня использовали стандартную методику Бруссера – по кинетике водопоглощения [11], на шлифах из цементного

камня без добавок и с исследуемыми добавками на поляризационном микроскопе МИН-8 ( $\times 90$ ) в проходящем и отраженном свете (рис. 5).



1 –  $K_2CO_3$ ; 2 – без добавки; 3 –  $K_2CO_3$  + СДБ в 10 %-ном растворе  $K_2SO_4$

Рисунок 4 – Изменение  $E_d$  (а) и деформаций бетонных образцов с добавками (б) в цементно-песчаный раствор



1 – добавка С-3; 2 – поташ

Рисунок 5 – Структура цементного камня с добавками в проходящем (а) и отраженном (б) свете

Кинетику водопоглощения определяли на предварительно высушенных до постоянной массы образцах из цементного камня ( $B / Ц = 0,5$ ), размером  $2 \times 2 \times 2$  см, твердевших 28 суток в нормальных условиях. Контроль водопоглощения проводили через 15, 30 минут и 24 часа (см. табл. 2). Влияние добавок на рост прочности искусственного камня оценивали по прочности на сжимающую нагрузку цементных образцов, твердевших 7, 14 и 28 суток в камере нормального твердения (табл. 2). В исследованиях использовали портландцемент марки 500.

Исследование влияния поташа и комплексной добавки на его основе (поташ + СДБ) на диффузионную проницаемость по отношению к агрессивным растворам проводили на образцах цилиндрах диаметром и высотой 50 мм из цементно-песчаного раствора состава  $1 : 2,5 = Ц : П$  при  $B / Ц = 0,46$ . Комплексный режим твердения образцов предусматривал 28 суток выдерживания при отрицательной темпе-

ратуре, соответствующей количеству вводимой добавки, и затем 28 суток в нормальных условиях. После твердения с целью устранения влияния капиллярного эффекта образцы насыщали водой до постоянной массы и покрывали парафином (за исключением одной торцевой стороны), чтобы диффузия агрессивного раствора проходила только в одном направлении.

Подготовленные образцы помещали открытой торцевой стороной в агрессивную среду – 10%-ные растворы сульфата и хлорида калия. Спустя 12 месяцев постоянного хранения образцы извлекали из растворов, послойно (0,3 см) разрезали и исследовали с помощью методов количественного химического анализа (см рис. 2). Интенсивность процесса диффузии агрессивных ионов зависит от размеров капилляров и характера пористости искусственного камня. Поэтому наибольшее количество сульфатов содержит поверхностный слой (0,3 см) образца с добавкой поташа (4%), наименьшее, вследствие формирования более плотной структуры с комплексной добавкой поташ + СДБ (2,4%), – в образце без добавки. Дальнейшая диффузия раствора затормаживается из-за коагуляции пор и капилляров сульфатосодержащими кристаллическими продуктами коррозии, что вызывает резкое уменьшение количества ионов на глубине 1,5...2 см (см. рис. 2). Проникающая способность хлор-ионов значительно выше, чем сульфатных, вследствие отсутствия химического взаимодействия агрессивного раствора с продуктами гидратации цементного камня, и зависит только от структуры материала. Поэтому наибольшей проницаемостью обладают образцы с добавкой поташа, имеющие структуру с большим объемом крупных капиллярных пор. Дополнительное введение добавки СДБ изменяет структуру камня, тем самым снижает проницаемость искусственного камня (см. рис. 2).

Для исследования влияния поташа и комплексной на его основе добавки на коррозионную стойкость искусственного камня в растворах сульфата и хлорида калия, соединений наиболее часто действующих на бетон при эксплуатации дорожного покрытия (в составах против обледенения) и гидротехнических сооружений (в составе морской воды), был применен жесткий переменный режим испытаний, предусматривающий попеременное насыщение образцов агрессивным раствором в течение 24-х часов (время полного насыщения) с последующим их высушиванием при температуре 70 °С в течение 48 часов (время полного высушивания). Изменения прочностных показателей в процессе коррозионных испытаний оценивали с использованием неразрушающего метода контроля по динамическому модулю упругости и деформациям расширения. Применение неразрушающего метода позволяет проследить изменения, происходящие в одних и тех же образцах, на протяжении всего периода испытаний, что повышает достоверность полученных результатов.

Динамический модуль упругости  $E$  рассчитывали по следующей формуле:

$$E = k \cdot P \cdot F^2,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий параметры образца, вид колебаний и размерность выбранных единиц измерений;  $P$  – вес образца, г;  $F$  – собственная частота колебаний, Гц.

Собственную частоту колебаний определяли на приборе ИКВТ-2.

Замер деформаций, сопровождающих структурные изменения в материале при действии соледержащих сред, проводили с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм по реперам, заложенным в торцы образцов при их изготовлении.

Изменения деформаций и динамического модуля упругости были выражены в процентах от соответствующей начальной величины, полученной до испытаний (см. рис. 3, 4).

Полученные данные подтверждают сделанные ранее предположения о пониженной коррозионной солестойкости составов с добавкой поташа (вследствие формирования дефектной структуры) по сравнению с контрольным бездобавочным и возможности повышения этого свойства за счет дополнительного ввода органической, пластифицирующей добавки СДБ.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие **выводы**:

- 1) реологические свойства цементных систем и структура цементного камня зависят от механизма действия добавок на поверхностные свойства цементного вяжущего;
- 2) введение органической гидрофильной добавки С-3 вызывает пептизацию цементных зерен за счет адсорбции на поверхности, повышение пластичности цементного раствора, формирование мелкопористой, плотной структуры;
- 3) противоморозная высокощелочная добавка поташа, связывая молекулы воды, способствует образованию крупных флокулов, их быстрому оседанию и, как следствие, повышению жесткости цементной системы, ускорению схватывания и формированию крупнопористой, дефектной структуры;
- 4) характер структуры предопределяет проницаемость и коррозионную стойкость искусственного камня на основе цемента. Вследствие этого добавка поташа повышает проницаемость и снижает коррозионную стойкость искусственного камня в соледержащих растворах хлорида и сульфата калия;

5) применение добавки поташа в комплексе с органической добавкой пластифицирующего действия, замедляющей структурообразование и повышающей плотность искусственного камня, позволяет снизить проницаемость и повысить солестойкость искусственного камня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-98. – Введ. 18.06.1998. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 1998. – 23 с.
2. Добавки в бетон: справочное пособие / В.С. Рамачандран [и др.]. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
3. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1977. – 220 с.
4. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Изд-во «ПАЛЕОТИП», 2006. – 244 с.
5. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1973. – 210 с.
6. Бабаев, В.А. Исследование реологических свойств цементного теста с суперпластификатором С-3 / В.А. Бабаев // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: тез. докл. III Всесоюзного симпозиума, Рига, 18–20 дек. 1979 г. / Рижский политехн. ин-т; под ред. Г.Я. Куннос. – Рига, 2005. – С. 58–60.
7. Шипулин, А.А. Реологические свойства цементного теста с суперпластификатором С-3 / А.А. Шипулин // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: тез. докл. III Всесоюзного симпозиума, Рига, 18–20 дек. 1979 г. / Рижский политехн. ин-т; под ред. Г.Я. Куннос. – Рига, 2005. – С. 75–76.
8. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. – М.: Стройиздат, 1982. – 150 с.
9. Курбатова, И.И. Влияние сульфата и карбоната калия на кинетику изменения состава жидкой фазы и структуру цементных паст / И.И. Курбатова // Физико-химические исследования цементного камня и бетона: тр. НИИЖБ. – М.: Госстройиздат, 1972. – Вып. 7. – С. 23–25.
10. Рамачандран, В.С. Наука о бетоне. Физико-химическое бетоноведение / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М.: Стройиздат, 1986. – 277 с.
11. Афанасьев, Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. – Киев: Будівельник, 1989. – 165 с.
12. БЕТОНЫ. Методы определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости: ГОСТ 12730.0-78. – Введ. 01.01.80. – Переизд. 1986 г. – Минск: Госстандарт. – 31 с.

Поступила 03.12.2015

#### RESEARCH MECHANISM ACTION OF CHEMICAL ADDITIONS ON PROPERTYS THE CEMENT SYSTEM

**Y. KIREYEVA, T. ERMOLAEVA, K. KOSTJURINA**

*The work contain the results investigation influence of chemical additions on propertys surface of cement grains, plasticity water-cement mixes, structure, strength and corrosion resistance of artificial stone. In the work investigate influence of additions, which widely use in monolith and road construction in summer (C-3) and winter (potash) conditions. Receive the facts about different action of additions on plasticity mixes, structure and property of artificial stone. Establish what the addition C-3 promote divide of cement grains, increase plasticity of water – cement mixes, form dense, strong structure of artificial stone. The addition potash induce coagulate of cement grains, formation large flocs, and as a consequence, porosity structure, high permeability of artificial stone, which decreases its corrosion resistance. Use of addition potash together with plasticizer improve propertys of artificial stone.*

УДК 624.012.4:666.972.165

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СУСПЕНЗИЙ***канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Анализируются режимы электропрогрева бетона в построечных условиях. Обоснован возможный интервал изменения температур и времени в процессе электропрогрева. Спланирован и проведен трехфакторный эксперимент для определения малоэнергоёмких режимов электрообработки бетона в построечных условиях. На основе экспериментальных данных определена скорость подъема температуры, максимальная температура в процессе электропрогрева и время выдержки при максимальной температуре, а также энергозатраты в процессе интенсификации твердения бетона.*

Бетонирование или усиление монолитных конструкций, определяющих темп и срок строительства и реконструкции объекта, ставит задачу разработки надежных и экономичных методов воздействия на бетон в период его твердения. Практика производства бетонных и железобетонных работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений показала, что основным методом интенсификации твердения бетона в построечных условиях является электротермообработка всех разновидностей. Выбор наиболее рационального метода электротермообработки зависит не только от характеристик обрабатываемой конструкции, но и от возможности применяемого метода, а также от имеющегося на стройплощадке оборудования.

**Основная часть.** С целью снижения энергозатрат при электрообработке необходимо применять методы, ускоряющие процессы гидратации цемента и структурообразования бетона, то есть активацию. Однако во всех работах для ускорения набора прочности бетона, изготовленного с применением любого вида активирования, используется тепловая обработка при помощи энергии пара, но не энергии электрического поля. Вместе с тем в литературе имеются данные, свидетельствующие о разной эффективности (к примеру, химических модификаторов) в зависимости от условий твердения. Широко распространенная противоморозная добавка поташ может использоваться совместно с паропрогревом [1], но её не рекомендуется применять в комбинации с электропрогревом бетона [2]. В этой связи большой интерес представляет вопрос о возможности использования электроактивации модифицированных цементных систем совместно с электропрогревом.

С целью определения энергосберегающих режимов электротермообработки, совместимых с активацией, область режимов электропрогрева бетона охватывала широкий интервал как скоростей подъема температуры, так и температур изотермической выдержки. При этом предварительное выдерживание длилось 2 часа, а скорость остывания поддерживалась равной 10 °С/ч.

Верхний предел изотермы для бетонов на порландцементе ограничен 80 °С. Но в ряде работ [1–5] показана возможность использования более высоких температур выдерживания – в пределах 80...90 °С. В работе [6] указывается верхний предел в 85 °С, а значение температуры 80 °С объясняется опасением возникновения перегрева из-за сложности соблюдения расчетных режимов.

Что касается модифицированных бетонов, то имеются данные [7] о выдерживании их даже при температуре, равной 98 °С.

Основываясь на этих данных, при выполнении исследований режим изотермического выдерживания принят в пределах 50...90 °С. Скорость подъема температуры варьировалась в широком диапазоне – от 5 до 20 °С/ч. Значения варьируемых факторов приведены в таблице 1.

Для описания выходных факторов применялась квадратичная модель.

**Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов**

Факторы	Наименование факторов	Уровни фактора		
		- 1	0	+ 1
$X_1$	Скорость подъема температуры, °С/ч	5	12,5	20
$X_2$	Температура изотермического прогрева, °С	50	70	90
$X_3$	Длительность изотермического прогрева, ч	3	6,5	10

Матрица планирования эксперимента и средних значений опытов приведены в таблице 2.

В условиях каждого опыта изготавливалось по 6 образцов, 3 из которых испытывались через 4 часа после окончания электропрогрева, а 3 – по истечении 28 суток.

Таблица 2 – Матрица планирования, средние значения энергозатрат и прочности бетона

№ опыта	Факторы варьирования			Натуральные значения факторов			Прочность бетона, МПа				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	скорость подъема температуры, °С/ч	температура изотермы, °С	длительность изотермы, ч	при использовании суспензии		стандартные условия		Энергозатраты, кВт·ч/м <sup>3</sup>
							через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	через 4 часа после электропрогрева	через 28 суток	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	+1	0	20	90	6,5	29,12	33,6	24,96	28,48	98
2	+1	-1	0	20	50	6,5	25,6	39,36	22,72	32,96	51
3	-1	+1	0	5	90	6,5	33,6	40,32	27,52	32,64	117
4	-1	-1	0	5	50	6,5	30,08	43,52	23,68	36,16	56
5	+1	0	+1	20	70	10	29,44	38,08	24,96	28,48	85
6	+1	0	-1	20	70	3	24,96	39,36	19,2	31,04	62
7	-1	0	+1	5	70	10	33,6	41,28	27,84	32,96	96
8	-1	0	-1	5	70	3	28,8	42,24	23,04	37,12	74
9	0	+1	+1	12,5	90	10	32,96	36,16	27,52	28,48	119
10	0	+1	-1	12,5	90	3	31,04	38,4	23,68	31,36	91
11	0	-1	+1	12,5	50	10	29,76	39,68	24,0	34,88	69
12	0	-1	-1	12,5	50	3	25,28	41,6	17,6	36,16	51
13	0	0	0	12,5	70	6,5	30,72	41,92	24,96	31,36	69
14	0	0	0	12,5	70	6,5	30,4	41,28	23,04	32,64	69
15	0	0	0	12,5	70	6,5	31,04	40,96	24,0	31,04	69

Одновременно изготавливались образцы с использованием суперпластификатора С-3 и ускорителя твердения (сульфата натрия) по существующей технологии, которые использовались для определения эффективности нового технологического решения.

Расчет коэффициентов модели, дисперсии воспроизводимости, дисперсии параметров модели, доверительные интервалы параметров модели производились по методике, приведенной в работах [8–10] с использованием критериев Стьюдента, Пирсона, Фишера. В результате соответствующей обработки экспериментальных данных получены следующие виды моделей прочности бетона в зависимости от режимов электропрогрева и времени испытания:

$$\bar{R}_s^a = 31 - 2,1X_1 + 2X_2 + 2X_3 - 0,6X_2X_3 - 0,8X_1^2 - 0,3X_2^2 - 0,7X_3^2, \quad (1)$$

$$\bar{R}_s^{a28} = 41 - 2X_1 - 2X_2 - 0,8X_3 - 0,6X_1X_2 - 0,5X_1^2 - 1,7X_2^2 - 0,7X_3^2, \quad (2)$$

$$\bar{R}_s = 24 - 1,3X_1 + 2X_2 + 2,6X_3 - 0,4X_1X_2 - 0,6X_2X_3 + 0,6X_1^2 - 0,9X_3^2, \quad (3)$$

$$\bar{R}_s^{28} = 32 - 2,2X_1 - 2,4X_2 - 1,4X_3 + 0,4X_1X_3 - 0,4X_2X_3 + 0,6X_2^2 + 0,4X_3^2. \quad (4)$$

Для определения координат оптимума находим частные производные и приравниваем их к нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_1} &= -2,1 - 1,6X_1 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_2} &= 2 - 0,6 \cdot X_3 - 0,6X_2 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^a}{dX_3} &= 2 - 0,6 \cdot X_2 - 1,4X_3 = 0 \end{aligned} \right\} I$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_1} &= -2 - 0,6X_2 - X_1 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_2} &= -2 - 0,6X_1 - 3,4X_2 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_s^{a28}}{dX_3} &= -0,8 - 1,4X_3 = 0 \end{aligned} \right\} II$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{R}_e}{dX_1} &= -1,3 - 0,4X_2 + 1,2X_1 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_e}{dX_2} &= 2 - 0,4X_1 - 0,6X_3 = 0 \\ \frac{d\bar{R}_e}{dX_3} &= 2,6 - 0,6X_2 - 1,8X_3 = 0 \end{aligned} \right\} III$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR_e^{28}}{dX_1} &= -2,2 + 0,4X_3 = 0 \\ \frac{dR_e^{28}}{dX_2} &= -2,4 - 0,4X_3 + 1,2X_2 = 0 \\ \frac{dR_e^{28}}{dX_3} &= -1,4 + 0,4X_1 - 0,4X_2 + 0,8X_3 = 0 \end{aligned} \right\} IV$$

Решение четырех систем уравнений представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Координаты экстремальных точек электропрогрева бетона

Факторы	Бетон с активированной цементной суспензией				Бетон для сравнения			
	через 4 часа после электропрогрева		через 28 суток после электропрогрева		через 4 часа после электропрогрева		через 28 суток после электропрогрева	
	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб	нормализованный масштаб	натуральный масштаб
X <sub>1</sub>	1,31	2,68	-1,84	-1,3	-2,42	-5,65	-3,68	-15,1
X <sub>2</sub>	0	70	-0,263	64,74	-10,5	-140	3,83	146,6
X <sub>3</sub>	3,33	18,15	-0,57	4,5	4,93	23,8	5,5	25,75

Как видно из таблицы 3, в рассматриваемой области экстремальной точки нет.

На рисунках 1 и 2 приведены результаты моделирования изменения прочности бетона с использованием активированных цементных суспензий и без них в зависимости от различных факторов.

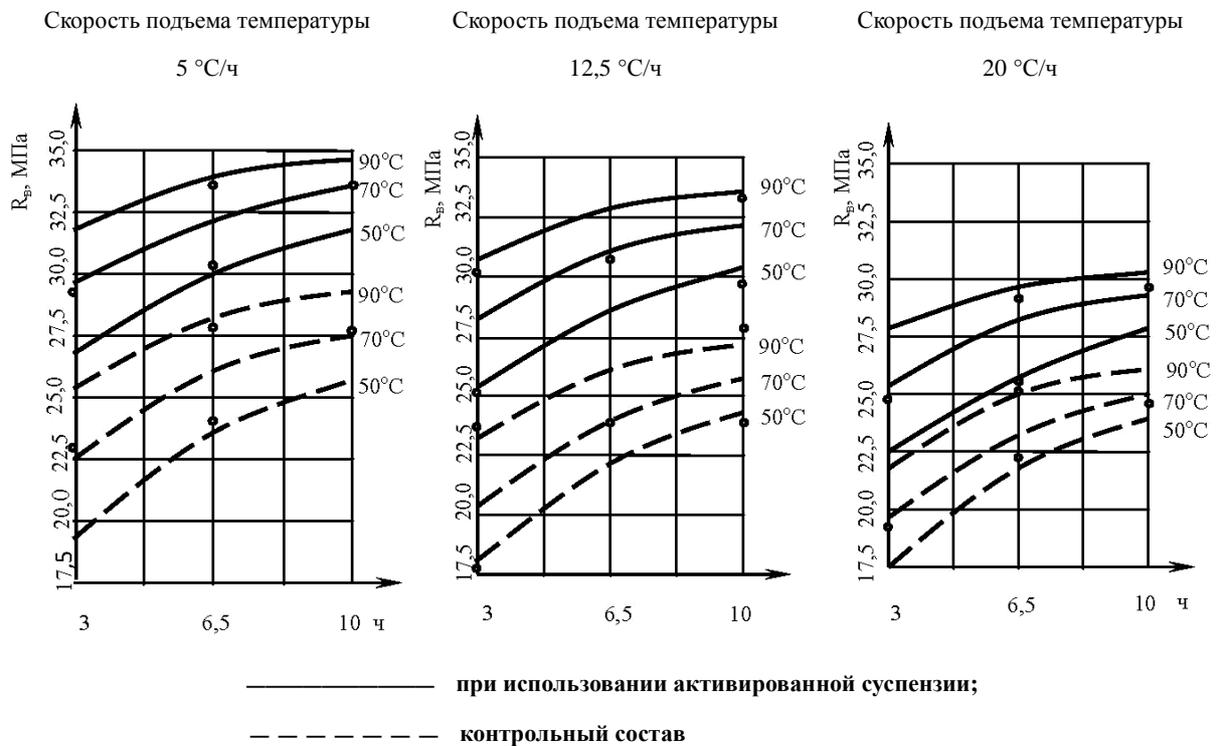
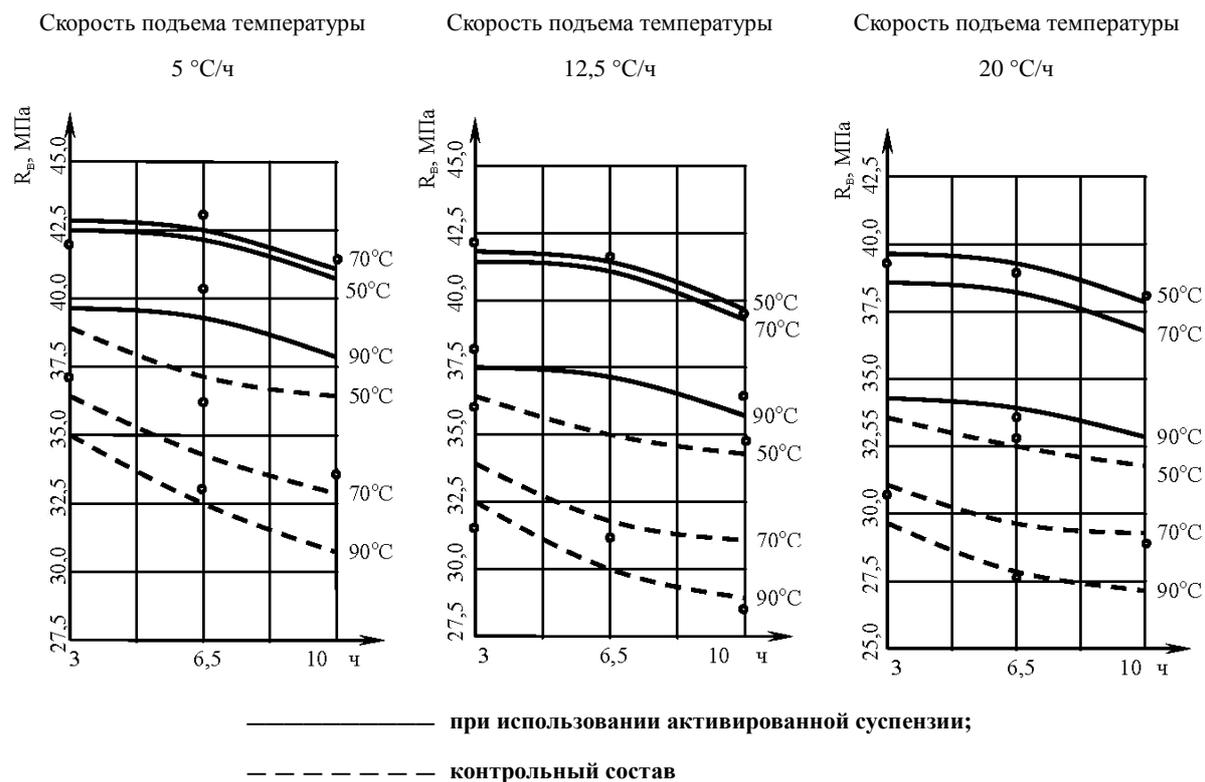


Рисунок 1 – Прочность бетона на сжатие через 4 часа после электропрогрева, при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева, в зависимости от длительности изотермического выдерживания



**Рисунок 2 – Прочность бетона на сжатие через 28 суток после электропрогрева, при различной скорости подъема температуры и различной температуре изотермического прогрева, в зависимости от длительности изотермического выдерживания**

Статический анализ моделей (1), (2), (3), (4) представлен в таблице 4.

**Таблица 4 – Проверка адекватности моделей**

Номер модели	Погрешность эксперимента	Остаточная сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия адекватности	Расчетное значение F-критерия Фишера	Табличное значение F-критерия Фишера	Вывод
(1)	0,1024	2,816	5	0,5632	5,5	19,3	адекватна
(2)	0,239	6,5643	5	1,3129	5,49	19,3	адекватна
(3)	0,9216	4,9936	5	0,9987	1,08	19,3	адекватна
(4)	0,7168	5,696	5	1,1392	1,59	19,3	адекватна

Анализ результатов проведенных экспериментов свидетельствует о том, что для бетонов, содержащих и не содержащих активированную цементную суспензию, влияние электропрогрева, оказываемое на прочность бетона, различно.

Влияние на прочность бетона, испытанного для сравнения через 4 часа после электропрогрева, выражается в том, что с увеличением времени и температуры изотермического выдерживания прочность увеличивается. Однако интенсивность набора прочности при всех температурах уменьшается при увеличении времени изотермы. Также с увеличением скорости подъема температуры прочность при всех температурах изотермы снижается и при увеличении продолжительности изотерм происходит сближение результатов.

Для бетонов 28-суточного возраста явно выражена тенденция снижения прочности с повышением температуры изотермической выдержки. Причем после 6...7 часов изотермического прогрева скорость снижения прочности уменьшается. Также для всех скоростей подъема температуры разность в прочности образцов, выдержанных при 50 и 70 °С, намного больше разности в прочности между образцами, выдер-

жанными при 70 и 90 °С. Это означает, что для получения большей прочности бетонов 28-суточного возраста необходимы низкотемпературные изотермы.

Однозначно виден факт, что наибольшая прочность достигается при малых скоростях подъема температуры в сочетании с низкой температурой изотермического выдерживания и малой ее продолжительностью. Аналогично наименьшая прочность получается при больших скоростях подъема температуры в сочетании с высокой температурой изотермического выдерживания и большой продолжительностью.

Для бетонов с использованием активированной цементной суспензии и испытанных через 4 часа после электропрогрева характерным является то, что чем больше температура изотермической выдержки, тем выше их прочность. Но с увеличением продолжительности изотермического выдерживания прочностные показатели во всем интервале температур сближаются. При температуре изотермической выдержки 90 °С после 6,5 часов независимо от скорости подъема прочность практически не увеличивается.

Можно отметить и то, что независимо от температуры изотермического выдерживания с увеличением скорости подъема температуры прочность бетона уменьшается.

При мягких режимах электропрогрева, то есть скорости подъема температуры составляет 5 °С/ч, через 6,5 часов изотермического выдерживания при температуре 50 °С прочность бетона такая же, как и при скорости подъема 12,5 °С/ч и продолжительности изотермического выдерживания 5 часов при температуре 70 °С. При скорости подъема температуры 12,5 °С/ч и 5 часов изотермического выдерживания при температуре 50 °С прочность одинакова с режимом выдерживания при скорости подъема температуры 20 °С/ч, изотерме 70 °С и длительности 5,5 часов.

Это имеет принципиальное значение, особенно для условий строительной площадки, так как для скорости подъема температуры 12,5 °С/ч необходимая мощность в три раза больше, чем для скорости подъема 5 °С/ч, и в 1,5 раза больше при скорости подъема 20 °С/ч по сравнению с 12,5 °С/ч. Так как на стройплощадке мощности обычно ограничены, то для производства работ по устройству монолитных конструкций более предпочтительны будут малые скорости подъема температуры.

Для бетонов, полученных с использованием активированной цементной суспензии в 28-суточном возрасте, характерным является уменьшение прочности при увеличении как температуры изотермической выдержки, так и скорости подъема температуры. Причем при малых скоростях подъема, составляющих 5 °С/ч, прочности бетона, выдержанного при 50 и 70 °С, сопоставимы, а далее разрыв увеличивается. Особенно большое расхождение в прочности бетона, выдержанного при 70 и 90 °С.

При всех скоростях подъема температуры и любой температуре изотермического выдерживания прочность бетона практически не изменяется при длительности изотермического выдерживания до 6,5 часов, но в последующем идет резкий ее спад с увеличением длительности. Это является наиболее существенным отличием в прочности бетонов, содержащих и не содержащих активированную цементную суспензию.

Снижение прочности бетона касается в особенности образцов, выдержанных при температуре 90 °С, причем при любой длительности изотермического выдерживания. Поэтому, очевидно, не следует использовать выдержку бетона при температуре свыше 70 °С.

При всех скоростях подъема температуры характер снижения прочности в зависимости от длительности изотермы практически одинаков и не зависит от скорости подъема температуры.

В основном нет больших отличий в характере изменения прочности при электропрогреве бетонов, приготовленных с использованием активированной суспензии и без нее. Как и при естественном твердении, сохраняется увеличение прочности бетона с активированной цементной суспензией по сравнению с бетонами без нее на 15...20%.

Анализ влияния продолжительности электропрогрева позволяет сделать вывод о том, что до 6,5 часов изотермического выдерживания показатели интенсивности нарастания прочности бетона близки у всех составов. После 6,5 часов у бетонов с активированной цементной суспензией наблюдается уменьшение скорости набора прочности. Причем такое уменьшение связано со скоростью подъема температуры и температурой изотермической выдержки. При температуре изотермы 50 °С скорость набора прочности при всех режимах практически не изменяется. При изотерме 70 °С интенсивность набора прочности неизменна только при скорости подъема температуры 5 °С/ч, при других скоростях подъема температуры после 6,5 часов интенсивность набора прочности резко убывает. Для изотермы 90 °С независимо от скорости подъема температуры после 6,5 часов выдержки интенсивность набора прочности резко уменьшается.

Для бетонов, не содержащих активированную цементную суспензию, уменьшение интенсивности набора прочности характерно только во время его изотермической выдержки при температуре 90 °С. Это может свидетельствовать о более интенсивных процессах структурообразования у бетонов, содержащих активированную цементную суспензию.

Для бетонов, изготовленных на электроактивированных суспензиях с применением электропрогрева и выдержанных 28 суток, однозначно просматривается тенденция в ограничении длительности изотермического прогрева, составляющей 6,5 часов, так как при большей его длительности независимо

от режимов наблюдается увеличивающийся недобор прочности. В случае отсутствия активированной суспензии однозначно определяется тенденция недобора прочности при увеличении длительности изотермического выдерживания. Это ещё один косвенный показатель того, что активированная часть цемента способствует на начальной стадии формированию более прочных структур, которые выдерживают температурные деформации.

**Заключение.** При применении для интенсификации твердения электропрогрева максимальная прочность бетона, приготовленного с использованием активированной цементной суспензии, достигается при мягких режимах проведения процесса, то есть при небольшой скорости подъема температуры, равной 5...12 °С/ч. С увеличением температуры изотермического прогрева свыше 50 °С прочность электроактивированного бетона в 28-суточном возрасте, как правило, снижается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1975. – 699 с.
2. Бетонные и железобетонные работы. Справочник строителя / под общ. ред. В.Д. Топчия. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
3. Абрамов, В.С. Электротермообработка бетона / В.С. Абрамов, Н.М. Данилов, Б.М. Красновский. – М.: Госстройиздат, 1975. – 165 с.
4. Волосян, Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий / Л.Я. Волосян. – Минск: Наука и техника, 1973. – 255 с.
5. Крылов, Б.А. Особенности возведения монолитных конструкций при отрицательных температурах / Б.А. Крылов, В.П. Филатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 3. – С. 4–5.
6. Хаютин, Ю.Г. Монолитный бетон / Ю.Г. Хаютин. – М.: Стройиздат, 1991. – 576 с.
7. Влияние обработки цементных суспензий на ускоренное твердение бетона / И.М. Грушко [и др.] // Бетон и железобетон. – 1981. – № 3. – С. 38–40.
8. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.
9. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИЖБ Госстроя СССР. – М., 1979. – 103 с.
10. Баженов, Ю.М. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона / Ю.М. Баженов, В.А. Вознесенский. – М.: Стройиздат, 1974. – 181 с.

Поступила 03.12.2015

#### ENERGY-SAVING MODES OF WARMING UP OF CONCRETE MIXTURES PREPARED BY USING ACTIVATED CEMENT SLURRIES

A. SHVEDOV

*The analysis of the modes of warming up of concrete in construction conditions. Proved possible interval of change of temperature and time in the process of warming up. Planned and executed three-factor experiment to determine the low-energy modes allows concrete built conditions. On the basis of experimental data, the speed of an early Wake-up temperature, the maximum temperature in the process of warming up and holding time at maximum temperature, and techenergосervice in the process of intensification of concrete hardening.*

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ, ЭКОЛОГИЯ И РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 697:721.011.25

### ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕПЛОВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕ ЧЕРДАЧНЫХ ЗДАНИЙ

канд. техн. наук, доц. **В.И. ЛИПКО**; **А.С. ЛАПЕЗО**; **С.В. ЛАНКОВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет)

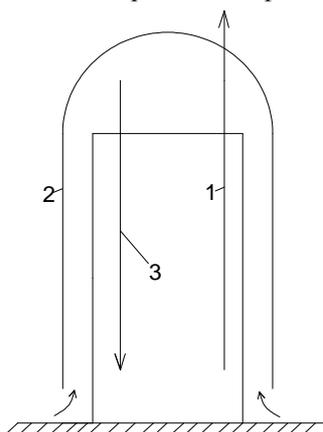
*Демонстрируется физическое и математическое моделирование теплообменных процессов отопительно-вентиляционной системы жилого здания с вентилируемым чердаком, навесными вентилируемыми светопрозрачными системами и рекуперативной схемой приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией вторичных и природных энергоисточников и естественной циркуляцией воздушных потоков. Приведена методика аэродинамического и теплотехнического расчёта систем энергоресурсоэффективного тепловоздушоснабжения зданий с повышенной теплозащитой и герметичностью наружных ограждающих конструкций.*

В инженерных системах вентиляции зданий в конструктивном исполнении приточно-вытяжных устройств наличие горизонтально расположенных воздуховодов не способствует созданию движущей силы гравитационного давления, а лишь увеличивает силы торможения этому движению из-за потерь давления на преодоление трения и местных сопротивлений. Движущая сила гравитации воздушного потока возникает лишь в вертикальных воздуховодах тем значительнее, чем больше их протяженность  $h$  и перепад температур наружного  $t_n$  и внутреннего  $t_e$  воздуха, что математически выражается формулой:

$$P_z = hg(\rho_n - \rho_e), \text{ Па}; \quad (1)$$

где  $h$  – протяженность вертикальных воздуховодов, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_n$ ,  $\rho_e$  – соответственно плотность наружного и внутреннего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

**Энергоэффективная технологическая схема тепло- и воздуховоснабжения зданий с вентилируемым чердаком, навесными вентилируемыми светопрозрачными системами и рекуперативной схемой приточно-вытяжной вентиляции с естественным побуждением.** В идеале, если здание закрыть воображаемым колпаком из светопрозрачного материала и проследить за тепловыми и воздушными потоками, можно представить физическую модель процесса, изображенную на рисунке 1.



- 1 – вытяжной воздуховод;  
2 – светопрозрачный колпак;  
3 – приточный воздуховод

**Рисунок 1** – Схема естественной вентиляции здания

Теплота, поступающая в жилые здания в виде бытовых тепловыделений в количестве  $Q_{\text{быт}}$ , определяется по формуле:

$$Q_{\text{быт}} = (9 \dots 21) \cdot F_n, \text{ Вт}, \quad (2)$$

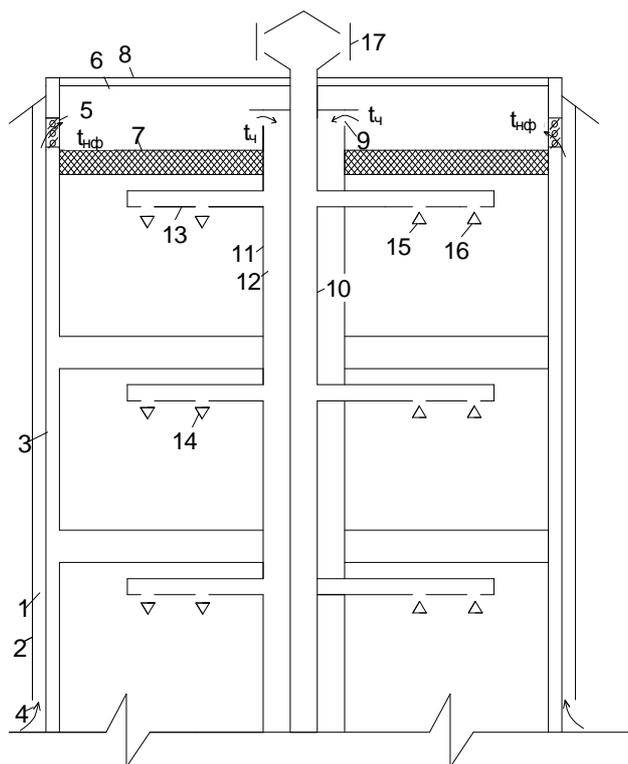
где  $F_n$  – площадь пола внутри здания, м<sup>2</sup>.

Эта теплота нагревает внутренний воздух, удаляемый под действием сил гравитации естественным путем через вытяжные каналы 1 в атмосферу, создавая внутри ограниченного колпаком 2 объема некоторое разрежение, под действием которого под колпак снизу поступает наружный холодный воздух, заполняя все пространство под ним. Здесь воздух нагревается под воздействием теряемой зданием через наружные ограждения трансмиссионной теплоты  $Q_{\text{тр}}$  круглосуточно и теплоты солнечной радиации  $Q_{\text{рад}}$  под действием парникового эффекта, создаваемого за счет инсоляции через светопрозрачный колпак в дневное время суток. За счет этой суммарной  $Q_{\Sigma} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{рад}}$  теплоты нагреваемый воздух вокруг здания, ограниченного светопрозрачным колпаком, становится легче, его плотность понижается и под действием сил гравитации он устремляется в верхнюю зону под крышу колпака.

Поскольку это процесс непрерывный, то в верхней зоне под колпаком возникает избыточное давление, которое способствует выдавливанию наружного воздуха по вертикальным приточным каналам 3 внутрь здания. Этому процессу способствует действие вытяжного вертикального канала 1, через который загрязненный теплый воздух удаляется в атмосферу, освобождая внутреннее пространство здания и создавая своеобразный вакуум, усиливая процесс втягивания наружного воздуха внутрь вентилируемых помещений здания.

Описанный процесс вентиляции здания по схеме, изображенной на рисунке 1, представляет собой действие теплового насоса, обеспечивающего устойчивую естественную циркуляцию воздуха в системах приточно-вытяжной вентиляции с энергоресурсоэффективным использованием вторичной теплоты, теряемой зданием через наружные ограждающие конструкции, и природной теплоты солнечной радиации, минимизируя, таким образом, теплотребление зданием от внешних энергоисточников.

Переходя от идеальной физической модели (см. рис. 1) к более реальным конструктивным решениям, рассмотрим технологическую схему приточно-вытяжной вентиляции здания, представленную на рисунке 2, в которой вместо идеального колпака функционально используются светопрозрачные вентилируемые навесные фасадные системы 1 и технологический чердак 2, выполняющий функции объемной приточной вентиляционной секционной камеры [1].



**Рисунок 2 – Фрагмент здания с вентилируемым чердаком, навесными вентилируемыми светопрозрачными системами и рекуперативной схемой приточно-вытяжной вентиляции с естественным побуждением**

В данной конструктивно-технологической схеме дополнительно используется в качестве вторичного энергоресурса утилизация теплоты вытяжного вентиляционного воздуха в комбинации приточно-вытяжных воздуховодов, выполненных в виде рекуперативного теплообменника, работающего на принципах противотока по схеме «труба в трубе».

Система энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения, изображенная схематично на рисунке 2, разработана с использованием патентов Республики Беларусь [1–3] и представляет собой высокотехнологичный вариант конструктивного решения теплоэнергообеспечения зданий с минимальными затратами энергоресурсов от внешних источников за счет широкого использования вторичных внутренних и природных внешних энергоисточников.

В предлагаемой технической схеме вентиляции используется: вторично трансмиссионная теплота, теряемая зданием через вертикальные и горизонтальные ограждающие конструкции; вторично теплота, содержащаяся в удаляемом вытяжном вентиляционном воздухе; дополнительно природная теплота прямой и рассеянной солнечной радиации, воспринимаемой навесным вентилируемым светопрозрачным фасадом и верхним покрытием чердака; гравитационное давление, возникающее в вертикальных каналах, образованных навесными вентилируемыми фасадными системами и вертикальным вытяжным воздуховодом, усиленных за счет природного ветрового давления дефлектором, установленным на вытяжной шахте.

Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания работает согласно технологической схеме циркуляционного контура движения воздушных потоков внутри многоэтажного здания с ограждающими конструкциями повышенной теплозащиты и герметичности, представленной на рисунке 2.

Наружный холодный воздух, заполняющий щелевой канал 1, образованный навесным вентилируемым светопрозрачным фасадом 2 и наружной поверхностью вертикального ограждения 3 через входное щелевое отверстие 4, начинает нагреваться, аккумулируя трансмиссионную теплоту, теряемую зданием через вертикальные ограждения 3 наружных стен и окон, и теплоту прямой и рассеянной солнечной радиации, воспринимаемой через светопрозрачную перегородку 2 под действием парникового эффекта в дневное время. При нагреве плотность воздуха уменьшается, под действием сил гравитации воздух устремляется вверх по щелевому каналу 1 и через отверстие 5 с регулируемой решеткой поступает в чердачный вентилируемый объем 6, ограниченный снизу утепленным согласно нормативным требованиям перекрытием верхнего этажа 7 и облегченной конструкцией верхнего покрытия чердака 8.

В объеме вентилируемого чердака наружный воздух, предварительно подогретый в щелевом канале 1 от температуры  $t_n$  наружного воздуха до температуры  $t_{н.ф.}$ , продолжает нагреваться от трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через перекрытие 7 верхнего этажа и легкое покрытие чердака 8 за счет прямой и рассеянной теплоты солнечной радиации в дневное время, и уже с температурой  $t_ч$  входит через кольцевое отверстие в рекуперативный теплообменник кожухотрубного типа противоточного действия приточно-вытяжной системы вентиляции, конструктивно выполненной по схеме «труба в трубе», где внутренний воздухопровод 10, транспортирующий теплый вытяжной воздух, который является греющим теплоносителем, расположен внутри приточного воздухопровода 11, образуя кольцевой канал 12.

При движении по кольцевому каналу 12 приточный воздух как более холодный по сравнению с внутренним воздухом, а значит и более тяжелый, под действием силы тяжести устремляется вниз по кольцевому каналу 12, одновременно нагреваясь по ходу движения через теплую поверхность вытяжного воздухопровода 10 за счет рекуперации, поступает в вентилируемые помещения через горизонтальные приточные воздухопроводы 13 с регулируемыми приточными решетками 14, из которых отработанный вентиляционный воздух через вытяжные регулируемые решетки 15 и кухонные вытяжки 16 выдавливается из помещений и поступает в сборный вытяжной воздухопровод 10, откуда под действием сил гравитации устремляется вверх и далее, усиливая естественную циркуляцию за счет природных сил ветрового давления, создаваемого дефлектором 17, выбрасывается в атмосферу.

**Физико-математическая модель тепломассообменных процессов отопительно-вентиляционной системы здания в многоступенчатой схеме утилизации вторичных и природных энергоресурсов.** Аналитически данная модель описывается следующим образом.

Теплоту, теряемую зданием круглосуточно через вертикальные ограждения  $Q_{mp}^{н.с.о}$ , рассматриваем одновременно с радиационной теплотой  $Q_{рад}^{н.с.о}$ , воздействующей через навесной вентилируемый светопрозрачный фасад в дневное время суток. Приточный наружный воздух при прохождении снизу вверх по щелевому каналу 1 аккумулирует трансмиссионную  $Q_{mp}^{н.с.о}$  и радиационную теплоту  $Q_{рад}^{н.с.о}$ , соответственно нагреваясь при этом на величину  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , то есть суммарный нагрев на 1-й ступени циркуляционного контура при прохождении через щелевой канал 1 составит:

$$\Delta t_{\Sigma}^I = \Delta t_1 + \Delta t_2. \quad (3)$$

Далее наружный приточный воздух поступает в вентилируемый чердак с температурой на входе  $t_{н.ф.}$ :

$$t_{н.ф.} = t_n + \Delta t_{\Sigma}^I. \quad (4)$$

Находясь в объеме вентилируемого чердака, наружный приточный воздух аккумулирует трансмиссионную теплоту  $Q_{mp}^{н.ч}$ , теряемую зданием через горизонтальную поверхность ограждения 7 перекрытия верхнего этажа, и одновременно аккумулирует теплоту  $Q_{рад}^{нок.}$  прямой и рассеянной солнечной радиации, воспринимаемую через легкое покрытие чердака. При прохождении объема вентилируемого чердака наружный приточный воздух одновременно дополнительно нагревается на величину  $\Delta t_3$ , аккумулируя  $Q_{mp}^{н.ч}$ , и на величину  $\Delta t_4$ , аккумулируя  $Q_{рад}^{нок.}$ , и перед входным отверстием 9 в рекуперативный теплообменник устройства приточно-вытяжной вентиляции на второй ступени циркуляционного контура дополнительно нагревается на величину  $\Delta t_{\Sigma}^{II}$ , равную

$$\Delta t_{\Sigma}^{II} = \Delta t_3 + \Delta t_4, \quad (5)$$

и его температура на входе в кольцевое отверстие 9 определится выражением:

$$t_ч = t_{н.ф.} + (\Delta t_{\Sigma}^I + \Delta t_{\Sigma}^{II}). \quad (6)$$

Далее наружный приточный вентиляционный воздух, двигаясь встречным потоком по кольцевому каналу 12, рекуперативно поглощает теплоту  $Q_{\text{выт.}}$  от удаляемого по внутреннему воздуховоду 10 теплового вытяжного воздуха и одновременно нагревается на величину  $\Delta t_{\text{рек.}}$ , а в вентилируемое помещение поступает с температурой  $t_{\text{пр}}$ , равной

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{н}} - (\Delta t_{\Sigma}^I + \Delta t_{\Sigma}^{II} + \Delta t_{\text{рек.}}). \quad (7)$$

Выполненные исследования по построению физической модели аэродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих по инновационной технологии энергоресурсоэффективного тепловоздухоснабжения в устройствах приточно-вытяжной вентиляции с более широким привлечением к использованию вторичных и природных энергоресурсов с целью снижения энергозатрат от внешнего энергопотребления при длительной эксплуатации многоэтажных чердачных зданий повышенной теплозащиты и герметичности ограждающих конструкций, позволяют перейти к более углубленному описанию рассматриваемых процессов методами математического моделирования через уравнения и зависимости, представленные в разделах теоретической физики и теплотехники.

**Построение математической модели и методики расчета аэродинамических и тепломассообменных процессов при работе устройства приточно-вытяжной вентиляции с естественной циркуляцией воздуха.** Рассмотрим три основные стадии моделирования в соответствии с принятой ступенчатой технологической схемой тепловоздухоснабжения многоэтажного чердачного здания с использованием:

- навесного светопрозрачного вентилируемого фасада с рекуперацией трансмиссионной теплоты, теряемой вертикальными ограждающими конструкциями наружных стен и окон в дневное и ночное время на протяжении всего отопительного периода, а также теплоты прямой и рассеянной радиации, воздействующей на здание в дневное время и способствующей его прогреванию за счет парникового эффекта;

- инновационно-модифицированного вентилируемого чердака здания, который благодаря технологическим преобразованиям из классической вытяжной вентиляционной секционной камеры превращен в приточную вентилируемую секционную объемную камеру с возможностью аккумуляции трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через перекрытие верхнего этажа, а также теплоты прямой и рассеянной солнечной радиации, воздействующей на здание через верхнее покрытие чердака, для дополнительного подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха, циркулирующего через чердачный объем;

- рекуперативного теплообменника, конструктивно выполненного из приточных и вытяжных воздухопроводов в виде кожухотрубного теплоутилизатора противоточного действия с транзитным отбором теплоты, содержащейся в вытяжном вентиляционном воздухе, для подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха с целью минимизации теплотребления от внешних энергоисточников.

На первой ступени рекуперации теплота, воспринимаемая наружным приточным воздухом, движущимся снизу вверх по щелеобразному воздухопроводящему каналу, нагревает его от наружной температуры  $t_{\text{н}}$  до конечной температуры  $t_{\text{к}}$  на входе в вентилируемый чердак, а осредненная температура воздуха внутри воздухопроводящего канала  $t_{\text{н.ф.}}$  равна

$$t_{\text{н.ф.}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{к}}}{2}. \quad (8)$$

Количество трансмиссионной теплоты  $Q_m$ , Вт, теряемой зданием в ночное время через наружные вертикальные ограждения, оборудованные светопрозрачными вентилируемыми фасадами, и воспринимаемой наружным приточным воздухом, движущимся по щелеобразному каналу, определится из выражения

$$Q_m = \left( \frac{F_{\text{н.с.}}}{R_{\text{н.с.}}} + \frac{F_{\text{ок.}}}{R_{\text{ок.}}} \right) \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н.ф.}}), \quad (9)$$

где  $F_{\text{н.с.}}$  – площадь наружных стен,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{ок.}}$  – площадь световых проемов,  $\text{м}^2$ ;  $R_{\text{н.с.}}$  и  $R_{\text{ок.}}$  – сопротивления теплопередаче соответственно наружных стен и световых проемов,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ .

Количество теплоты,  $Q_{\text{рек.}}$ , Вт, затраченной на нагрев приточного вентиляционного наружного воздуха в количестве  $L$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , определим как

$$Q'_{\text{рек.}} = 0,28L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}). \quad (10)$$

Здесь  $L$  – количество приточного вентиляционного наружного воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – теплоемкость воздуха, равная  $1,0 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ .

Согласно тепловому балансу правые части в уравнениях (9) и (10) приравняем и получим

$$0,28L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = \left( \frac{F_{\text{н.с.}}}{R_{\text{н.с.}}} + \frac{F_{\text{ок.}}}{R_{\text{ок.}}} \right) \cdot \left( t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{к}} + t_{\text{н}}}{2} \right). \quad (11)$$

Считаем, что навесной светопрозрачный фасад установлен только с южной стороны здания. Приняв нормативные и фактические значения входящих в формулу (9) величин для односекционного 10-этажного жилого здания с размерами 12×24×30 м и коэффициентом оконного остекления  $K_{ост} = 0,35$ , для города Витебска, запишем уравнение (11) следующим образом:

$$0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot (t_k - (-25)) = \left( \frac{1330}{3,2} + \frac{756}{1,0} \right) \cdot \left( 20 - \frac{t_k + (-25)}{2} \right), \quad (12)$$

или

$$\frac{0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,4 \cdot 1}{1330/3,2 + 756/1,0} = \frac{20 - 0,5 \cdot t_k + 0,5 \cdot (-25)}{t_k + 25}, \quad (13)$$

которое решается для  $t_k = +1,5$  °С.

Так как температура на входе в объем вентилируемого чердака из под навесного вентилируемого фасада определена и составляет  $t_k = +1,5$  °С, то аналогично уравнение (11) можно записать для вентилируемого чердака:

$$0,28 \cdot L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{в.ч} - t_n) = \frac{F_{пок}}{R_{пок}} \cdot \left[ \left( \frac{t_{в.ч} + t_n^{пек}}{2} \right) - t_n \right], \quad (14)$$

откуда  $t_{в.ч} = +2,1$  °С, то есть под действием теплоты, теряемой зданием через потолочное перекрытие верхнего этажа, температура приточного воздуха, циркулируемого в объеме вентилируемого чердака, дополнительно подогревается от  $t_k = +1,5$  °С до  $t_{в.ч} = +2,1$  °С в ночное время, но одновременно и охлаждается через верхнее покрытие чердака от  $t_{в.ч} = +2,1$  °С до  $t_{нач}^{пек}$ , которая определится из уравнения:

$$\frac{0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,36 \cdot 1}{288/6,0} = \frac{20 - 0,5 \cdot t_{в.ч} - 0,5 \cdot 1,5}{t_{в.ч} - 1,5}, \quad (15)$$

откуда  $t_{нач}^{пек} = 0,73$  °С, то есть на входе в рекуператор температура наружного приточного воздуха повышается благодаря трансмиссионной теплоте, теряемой зданием через перекрытие верхнего этажа, от температуры  $t_{н.ф} = +1,5$  °С до  $t_{в.ч} = +2,1$  °С и одновременно снижается за счет потерь теплоты через верхнее покрытие чердака до значений  $t_n^{сп} = +18$  °С в ночное время.

Как показал анализ графиков изменения температур в противоточном воздухо-воздушном теплообменнике-теплоутилизаторе кожухотрубного исполнения при переменных режимах работы, полученных при расчете по безразмерным комплексам [4, с. 198], температура греющего теплоносителя снижается от  $t_n^{сп} = +18$  °С до  $t_k^{сп} = +5,45$  °С, а температура нагреваемого теплоносителя изменяется в ночное время от  $t_n^{ноч} = 0$  °С до  $t_k^{ноч} = +17,6$  °С, то есть практически до нормативного значения.

Теперь рассмотрим воздействие прямой и рассеянной солнечной радиации на тепловой режим здания с навесным светопрозрачным вентилируемым фасадом, вентилируемым чердаком, используемым в качестве приточной объемной секционной вентиляционной камеры, и рекуперативным теплообменником-утилизатором кожухотрубного типа в противоточном воздухо-воздушном исполнении.

Математическое моделирование тепломассообменных процессов при работе устройства приточно-вытяжной вентиляции базируется на основе физической модели с составлением и решением уравнений теории аэродинамики и теплотехники.

При проектировании установок, использующих природную теплоту прямой и рассеянной солнечной радиации для обогрева зданий и предварительного подогрева наружного приточного вентиляционного воздуха, необходимо знать средние поступления прямой солнечной радиации за сутки по месяцам года с учетом продолжительности отопительного периода.

В работе [5] приведен коэффициент пересчета средних суточных поступлений прямой солнечной радиации с горизонтальной поверхности на вертикальную ( $K$ ) в зависимости от ориентации поверхности, географической широты местности и времени года:

$$Q_{в.р} = K \cdot Q_c, \quad (16)$$

а при наклонной поверхности 
$$Q_{н.р} = Q_c \cdot (\cos\beta + K \cdot \sin\beta), \quad (17)$$

где  $\beta$  – угол наклона поверхности к горизонту;  $Q_c$ ,  $Q_{в.р}$ ,  $Q_{н.р}$  – поток прямой солнечной радиации соответственно на горизонтальную, вертикальную и наклонную поверхности к горизонту.

В таблицах 1–3 приведены значения коэффициента  $K$  пересчета средних суточных поступлений прямой радиации с горизонтальной поверхности на вертикальную для поверхности южной ориентации, расположенной на широте местности города Минска ( $54^\circ$  с. ш.) осредненно на 15-е число каждого месяца [5].

Таблица 1 – Значения коэффициента  $K$  по месяцам

Широта местности, град, с. ш.	Месяцы года												Среднее значение $K$ за отопительный период
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
54	4,5	2,55	1,5	0,84	0,52	0,4	0,44	0,68	1,17	2,0	3,7	5,4	2,95

Таблица 2 – Месячные и годовые поступления на горизонтальную поверхность прямой  $Q_{н.з}$  (числитель) и рассеянной  $Q_{рас.}$  (знаменатель) солнечной радиации, МДж/м<sup>2</sup>, для города Минска [5]

Географический район	Месяцы года												За год
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
Минск	$\frac{1,7}{5,0}$	$\frac{4,2}{9,6}$	$\frac{14,2}{16,7}$	$\frac{18,8}{21,8}$	$\frac{30,1}{27,6}$	$\frac{34,3}{29,3}$	$\frac{31,8}{28,9}$	$\frac{22,6}{23,4}$	$\frac{15,1}{16,3}$	$\frac{5,9}{10,5}$	$\frac{1,7}{5,0}$	$\frac{0,8}{3,3}$	$\frac{181,3}{197,6}$

Таблица 3 – Месячные и годовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную и вертикальную поверхности различной ориентации при средних условиях облачности, МДж/м<sup>2</sup>, для города Минска [5]

Поверхность	Месяцы года												За год
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
Горизонтальная	69	133	291	393	567	624	590	478	315	154	59	41	3714
Вертикальная (С)	49	92	151	150	213	250	233	176	118	66	32	29	1559
Вертикальная (В)	63	116	224	245	351	391	360	299	204	100	43	36	2432
Вертикальная (Ю)	128	196	339	295	345	345	339	334	290	182	84	71	2948
Вертикальная (З)	66	123	233	237	320	358	339	282	203	104	45	37	2347

С, В, Ю, З – ориентация поверхности по сторонам света.

Количество рассеянной солнечной радиации при практических расчетах определится как

$$Q_{рас.лк} = Q_{рас.з} (1 + \cos\beta) / 2. \quad (18)$$

Значение суммарной солнечной радиации найдем по формуле

$$Q_{\Sigma} = Q_z (\cos\beta + K \cdot \sin\beta) + Q_{рас.з} (1 + \cos\beta) / 2. \quad (19)$$

Для рассматриваемого здания с размерами  $13,8 \times 25,6 \times 30$  м площадь вентилируемого чердака при плоской крыше  $F_v = 13,8 \times 25,6 = 353 \text{ м}^2$  горизонтальной площади, на которую падает тепловой поток солнечной радиации в отопительный период, равный 210 суток осредненно для географического района города Минска по данным [6, с. 30], определится из выражения

$$J_{рад.}^{гор} = \frac{Q_z}{t} = \frac{1101 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 10^6} = \frac{1101 \cdot 10^6}{7 \cdot 30 \cdot 24 \cdot 3600} = 612 \text{ Вт/м}^2. \quad (20)$$

По конструктивно принятому  $R_{нок}^u = 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$  и площади чердака  $F_u = 353 \text{ м}^2$  определим количество теплоты, прошедшей через ограждение и аккумулируемой приточным наружным вентиляционным воздухом:

$$Q_{нок} = \frac{F_u}{R_n} \cdot (t_{к.ч} - t_{н.ч}^0), \quad (21)$$

где  $F_u$  – площадь покрытия,  $\text{м}^2$ ;  $R_n$  – сопротивления теплопередаче покрытия,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ;  $t_{н.ч}^0$  и  $t_{к.ч}$  – температура в чердаке соответственно начальная и конечная,  $\text{°C}$ .

Количество теплоты, аккумулируемой приточным наружным воздухом в объеме вентилируемого чердака, определится из выражения:

$$Q_u = 0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,35 \cdot 1 \cdot (t_{н.р} - t_{н.ч}). \quad (22)$$

Передача теплоты при совместном действии разности температур и потока суммарной солнечной радиации  $J$ ,  $\text{МДж} / \text{м}^2$ , в дневное время суток рассчитывается как

$$t_{усл} = t_n + \Delta t_p = t_n + p \cdot \frac{J}{\alpha_n}, \quad (23)$$

Для условий города Минска имеем при  $t_{н.ср}$  суточной за отопительный период

$$t_{усл} = (-1,6) + 0,8 \cdot \frac{612}{23} = 19,7 \text{ °C}.$$

где  $t_{усл}$  – условная наружная температура,  $\text{°C}$ ;  $t_n = -1,6 \text{ °C}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период для города Минска;  $\Delta t_p$  – изменение наружной температуры за счет суммарной солнечной радиации,  $\text{°C}$ ;  $p$  – коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхностью ограждения [7, с. 13];  $J$  – тепловой поток суммарной солнечной радиации,  $\text{Вт} / \text{м}^2$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждения,  $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$ .

Количество теплоты, поступающей на нагрев приточного наружного вентиляционного воздуха через покрытие вентилируемого чердака в дневное время за счет солнечной радиации:

$$Q_{нок} = \frac{F_u}{R_n} \cdot [t_{к} - t_n] = \frac{353}{2} \cdot ((-1,6) + 21,3) = 3477 \text{ Вт}. \quad (24)$$

Количество теплоты, аккумулируемой приточным наружным вентиляционным воздухом, проходящим через вентилируемый чердак, повышает его температуру от  $t_{н.ф}^u = +1,5 \text{ °C}$  до температуры на входе в рекуперативный теплообменник  $t_{н.ф}^к$ , которая определяется следующим образом:

$$Q_{нок} = 0,28L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{н.ф}^к - t_{н.ф}^u), \quad (25)$$

или

$$3477 = 0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,3 \cdot 1 \cdot (t_{н.ф}^к - 1,5);$$

$$3477 = 1310 \cdot t_{н.ф}^к - 1965;$$

$$t_{н.ф}^к = \frac{3477 + 1965}{1310} = +4,15 \text{ °C}.$$

Для учета теплоты солнечной радиации, воздействующей на нагрев приточного наружного вентиляционного воздуха, движущегося по щелевому каналу, образованному навесным вентилируемым светопрозрачным фасадом и наружной поверхностью наружного ограждения, определим сначала условную наружную температуру:

$$t_{усл} = t_n + \Delta t_p = t_n + p \cdot \frac{J}{\alpha_n} = (-1,6) + \frac{0,7 \cdot 1000}{23} = 28,8 \text{ °C}. \quad (26)$$

где  $p = 0,7$  – коэффициент поглощения тепла солнечной радиации поверхностью ограждения из красного кирпича;  $J = \frac{1800 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 10^6} = 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$  – осредненная суммарная солнечная радиация за 7 месяцев отопи-

тельного периода, переведенная с МДж/м<sup>2</sup> на Вт/м<sup>2</sup>; 1800 МДж/м<sup>2</sup> – суммарная солнечная радиация за 7 месяцев отопительного периода для города Минска, взятая из таблицы 3;  $\alpha_n = 23 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$  – коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждения [8];  $t_n = -1,6 \text{ °C}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период для города Минска.

Количество теплоты, аккумулируемой приточным вентиляционным воздухом, циркулирующей по щелевому каналу через нагретую солнцем остекленную поверхность навесного южного фасада размерами 25,6×30 м

$$Q_p^{n,\phi} = \frac{F_n}{R_{ок}} \cdot (t_{усл} - t_{сп}^{n,\phi}) = \frac{768}{0,15} \cdot (28,8 - 11,2) = 90112 \text{ Вт.} \quad (27)$$

Количество теплоты  $Q_p^{n,\phi} = 90112 \text{ Вт}$  поднимает температуру приточного вентиляционного воздуха со средней  $t_{n,сп} = -11,2 \text{ °C}$  до температуры  $t_{n,ч}$ , которая определится из выражения:

$$Q_p^{n,\phi} = 0,28L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_q^{n,ч} - t_{n,\phi}), \quad (28)$$

или

$$13517 = 0,28 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 40 \cdot 1,3 \cdot (t_q^{n,ч} - 1,5),$$

откуда  $t_q^{n,ч} = +11,8 \text{ °C}$ .

Таким образом, в дневное время суток при прохождении через щелевой канал наружный приточный вентиляционный воздух нагревается суммарно от рекуперации трансмиссионной теплоты в ночное время от  $t_n = -24 \text{ °C}$  до температуры  $t_q^{n,рек} = +1,5 \text{ °C}$  и от солнечной радиации в дневное время еще на  $t_q^{n,рад} = 11,8 \text{ °C}$  и составляет

$$t_q^{n,\Sigma} = 11,8 + 1,5 = 13,3 \text{ °C.}$$

Аэродинамические исследования тепломассообменных процессов при работе устройства приточно-вытяжной вентиляции базируются на определении естественного гравитационного давления, возникающего в трехступенчатой схеме циркуляционного контура воздушных потоков, циркулирующих внутри герметичного здания.

На первой ступени циркуляции при прохождении наружного приточного воздуха внутри щелевого вентиляционного канала, образованного навесным светопрозрачным фасадом и наружной поверхностью наружного ограждения, и его подогреве от  $t_n = -24 \text{ °C}$  до температуры  $t_q^{n,рек} = +1,5 \text{ °C}$  в ночное время создаваемое естественное гравитационное давление определится из выражения:

$$P_{сп,н}^{n,\phi} = hg(\rho_n - \rho_{n,\phi}^n) = 30 \cdot 10 \cdot (1,4 - 1,28) = 36 \text{ Па.} \quad (29)$$

В дневное время эта величина увеличится за счет суммарной солнечной радиации и составит при  $t_q^{n,\Sigma} = 13,3 \text{ °C}$

$$P_{сп,н}^{n,\phi} = 30 \cdot 10 \cdot (1,4 - 1,23) = 51 \text{ Па.}$$

При движении приточного наружного вентиляционного воздуха сверху вниз по кольцевому каналу рекуперативного устройства приточно-вытяжной вентиляции естественное гравитационное давление изменяется от наименьшего для верхнего этажа:

$$P_{сп,в}^{p,m} = hg(\rho_q - \rho_{ном}) = 4 \cdot 10 \cdot (1,28 - 1,26) = 0,8 \text{ Па.}$$

При движении вытяжного воздуха по вертикальному каналу с удалением отработанного воздуха из верхнего этажа с температурой  $t_{y\delta} = 6,6 \text{ °C}$  возникает дополнительное гравитационное давление, равное

$$P_{сп}^{y\delta} = hg(\rho_q - \rho_{y\delta}) = 8 \cdot 10 \cdot (1,28 - 1,26) = 1,6 \text{ Па.}$$

Таким образом, суммарное гравитационное давление будет положительным и составит в ночное время следующую величину:

$$P_{сп} = P'_{сп} + P''_{сп} + P'''_{сп} = 36 + 0,8 + 1,6 = 38,4 \text{ Па.}$$

Кроме того, дефлектор на вытяжной шахте обеспечивает дополнительную устойчивость работы устройства приточно-вытяжной вентиляции здания за счет природной энергии ветра, исключая полностью опрокидывание циркуляции.

В дневное время под воздействием солнечной радиации гравитационное давление, обеспечивающее естественную циркуляцию воздуха, многократно увеличивается, снижая нагрузку на систему отопления здания от внешних энергоисточников и активизируя работу приточно-вытяжной вентиляции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технологический чердак здания: пат. 9618 Респ. Беларусь, МПК7 E04H1/02 / В.И. Липко, Е.С. Добро-сольцева, С.В. Липко, С.В. Ланкович; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20130302; заявл. 2013.04.09; опубл. 2013.07.22 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013.
2. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания: пат. 8381 Респ. Беларусь, МПК7 F24D7/001 / В.И. Липко, С.В. Липко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20120004; заявл. 2012.01.02; опубл. 2012.04.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012.
3. Устройство приточно-вытяжной вентиляции здания: пат. 7952 Респ. Беларусь, МПК7F24F7/00 / В.И. Липко, С.В. Липко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20110378; заявл. 2011.05.13; опубл. 2011.11.15 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011.
4. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий: в 2-х т. Т. 1. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2004. – 212 с.
5. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. – М.: Высш. школа, 1970. – 376 с.
6. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий: в 2-х т. Т. 2. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2004. – 392 с.
7. Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2001.
8. Технический кодекс установившейся практики: ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). Строительная тепло-техника. Строительные нормы проектирования. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 32 с.

Поступила 26.11.2015

#### ENERGY AND RESOURCES EFFICIENT HEAT-AIR-SUPPLY OF ATTIC BUILDINGS

V. LIPKO, A. LAPEZO, S. LANCKOVICH

*In this article in detail presents the physical and mathematical modeling of heat-mass exchange's processes of heating and ventilation system of a apartment building with a ventilated attic, a ventilated translucent systems and regenerative scheme of suction-and-exhaust ventilation with recovery waste and natural energy sources and natural circulation air flow, the methodology of aerodynamic and thermal calculation of systems energy resource effective heat and air supply of buildings with enhanced thermal insulation and hermiticity of walls of the building.*

УДК 519.688:674.047.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ; А.С. ЛАПЕЗО; Т.А. ХОМЧЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается движение воздушного потока в сушильной камере. Приведены системы уравнений с начальными и граничными условиями, описывающие ламинарные и турбулентные течения. На основе уравнений турбулентного течения воздуха проведено численное моделирование потока воздуха в сушильной камере в широком диапазоне значений расхода воздуха, нагнетаемого в камеру сушки. Проанализированы результаты моделирования, представляющие распределение скоростей воздушного потока в камере, профили скоростей потока над объектом сушки. Предложены конструктивные решения для увеличения равномерности движения воздуха у поверхности объекта сушки.

**Введение.** Расчет движения воздуха необходим при проектировании и оптимизации сушильных камер и систем вентиляции. В частности, скорость и качество сушки пиломатериалов и ее равномерность в значительной степени зависят от направления, величины и однородности скорости воздушного потока у поверхности. Закономерности испарения воды со свободной поверхности определяются физическими условиями на границе раздела двух фаз «воздух – вода». Установлено что скорость испарения воды в воздух пропорциональна разности давлений водяного пара у поверхности воды  $p_n$  и в окружающей среде  $p_n$ . Давление пара у поверхности воды соответствует его давлению в состоянии насыщения при температуре воды. Интенсивность испарения  $I$ , кг/(м<sup>2</sup>ч), воды при нормальном барометрическом давлении приближенно можно оценить по формуле Дальтона [1]:

$$I = c \cdot (p_n - p_n), \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент испарения, учитывающий скорость воздуха и его направление у поверхности.

При параллельном направлении воздушного потока к испаряемой водной поверхности и его температуре в диапазоне 60...250 °С коэффициент  $c$  приближенно равен

$$c = 0,1 \cdot (0,0017 + 0,0013 \cdot v), \quad (2)$$

где  $v$  – скорость воздуха у поверхности, м/с.

Стоит отметить, что при направлении воздушного потока, перпендикулярном к поверхности, интенсивность испарения удваивается.

При высокоскоростных способах сушки, таких как сушка энергией ВЧ- или СВЧ-полем, радиационная и вакуумная сушка, имеет место интенсивное испарение влаги с поверхности материала, которая удаляется движущимся воздухом – сушильным агентом. Очевидно, что при данных способах сушки к равномерности движения воздуха предъявляются повышенные требования.

Задачами данной работы являются: провести математическое моделирование, исследовать и выявить особенности движения воздуха в сушильной камере, при этом определить конструктивные решения по обеспечению равномерности воздушного потока у поверхности объекта сушки

**Основная часть.** Макет сушильной камеры представляет собой параллелепипед с размерами 600×600×1000 мм, выполненный из листового металла.

В верхней части камеры располагаются щелевые излучатели для ввода энергии СВЧ-поля, внизу – поддон для размещения высушиваемых материалов. Объект сушки задавался в виде пластины с размерами 400×50 мм, расстояние от него до поддона принималось равным четверти длины волны СВЧ-поля, составляющей 30 мм.

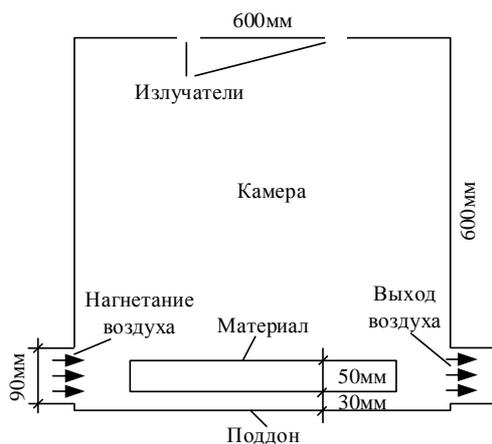


Рисунок 1 – Геометрия моделирования

**Математическая модель.** Для расчета движения воздуха применяются системы уравнений Навье – Стокса [1]. Для ламинарного течения несжимаемой среды система уравнений имеет вид:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pl + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F, \quad (3)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0.$$

В формуле (3)  $u$  – скорость воздуха, м/с;  $p$  – давление воздуха, Па;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Граничные условия для нагнетания, стока воздуха и на стенке соответственно определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n}, \quad \mathbf{n}^T \left[ -pl + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \mathbf{n} = -p_0, \quad \mathbf{u} = 0, \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $U_0$  – скорость нагнетаемого воздуха на границе нагнетания, м/с;  $p_0$  – давление воздуха на границе стока, Па;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к границе.

Для моделирования турбулентных течений с высокими числами Рейнольдса используют стандартную модель типа « $k - \varepsilon$ » [2–8], в которой совместно с уравнением Навье – Стокса решается два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_T$ . Эти дополнительные уравнения составляют так называемую стандартную высокорейнольдсовую модель турбулентности Сполдинга – Лаундера. Для определения турбулентной вязкости в этой модели определяются два скалярных параметра: удельная кинетическая энергия турбулентности  $k$  и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности  $\varepsilon$ . Данная система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= \nabla \cdot \left[ -pl + (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + F, \\ \rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) &= 0, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \varepsilon, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} p_k, \\ \mu_T &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad p_k = \mu_T \left[ \nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – безразмерные эмпирические константы ( $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ );  $k$  – турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $\mu_T$  – турбулентная динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $p_k$  – скорость образования вихрей.

Граничные условия:

- для нагнетания воздуха

$$\mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n}, \quad k = \frac{3}{2} (U_0 \cdot I_T)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_T}; \quad (6)$$

- для стока воздуха

$$\begin{aligned} \mathbf{n}^T \left[ -pl + (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \mathbf{n} &= -p_0, \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{t} &= 0, \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

- на стенке (пристенная функция)

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} &= 0, \\ \left[ (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] \mathbf{n} &= -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} u_{\text{tang}}, \quad u_{\text{tang}} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}, \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \varepsilon &= \rho \cdot \frac{C_\mu k^2}{\kappa_w \delta_w^+ \mu}. \end{aligned} \quad (8)$$

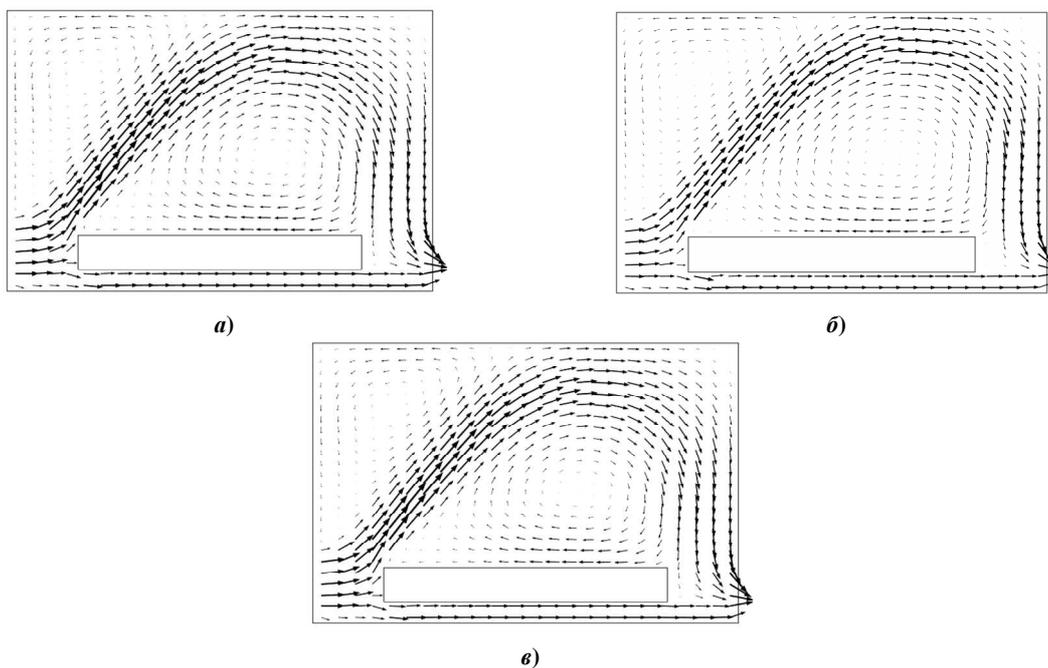
**Моделирование.** Моделирование проводилось с применением модели течения воздуха типа « $k - \epsilon$ », с использованием пакетов прикладных программ, обеспечивающих численное решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в двумерной области методом конечных элементов. Принималось, что физические параметры воздуха не зависят от температуры, давления и скорости воздуха: динамическая вязкость воздуха  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с; плотность воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. В процессе моделирования значение расхода воздуха  $Q$  на границе нагнетания воздуха в камеру варьировалось в широких пределах – от 0,1 до 5000 м<sup>3</sup>/ч, причем скорость воздуха на границе  $u_0$  и расход воздуха  $Q$  связаны соотношением:

$$u_0 = \frac{Q}{L}, \quad (9)$$

где  $L$  – сечение границы нагнетания воздуха, м<sup>2</sup>.

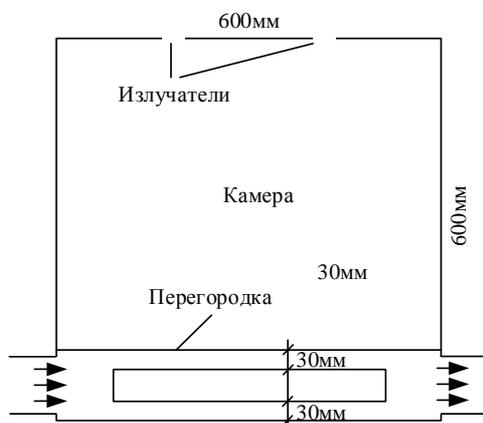
На границе стока воздуха давление  $p_0$  принималось равным нулю. Референсное значение давления воздуха принималось равным атмосферному.

В результате моделирования получены векторные распределения скоростей воздуха в камере, которые для некоторых значений расхода приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Распределение скорости воздуха в камере при расходах  $Q$  нагнетаемого воздуха: 30 м<sup>3</sup>/ч (а); 100 м<sup>3</sup>/ч (б); 600 м<sup>3</sup>/ч (в)**

Из рисунка 2 видно, что при любых расходах нагнетаемого воздуха его движение с разных сторон объекта сушки крайне неодинаково. С одной стороны объекта есть зона нулевой скорости воздуха, а также видно образование вихря и движение воздуха в обратном направлении. Со стороны поддона по всей длине объекта сушки движение воздуха равномерное.



**Рисунок 3 – Геометрия моделирования**

Очевидно, что данное распределение скоростей связано с геометрией камеры. Для исключения данного эффекта предлагается установить перегородку из прозрачного для СВЧ-поля материала над объектом сушки, как показано на рисунке 3.

На рисунке 4 показаны результаты моделирования – распределение скоростей воздушного потока при некоторых значениях расхода  $Q$  нагнетаемого в камеру воздуха. Движение воздуха у поверхностей образца одинаково и более однородно, чем в предыдущем случае (см. рис. 2), что видно из рисунка 4. Однако при большем расходе и, соответственно, больших скоростях воздуха наблюдается завихрение у поверхности образца вблизи торцевых участков, как показано на рисунке 5.

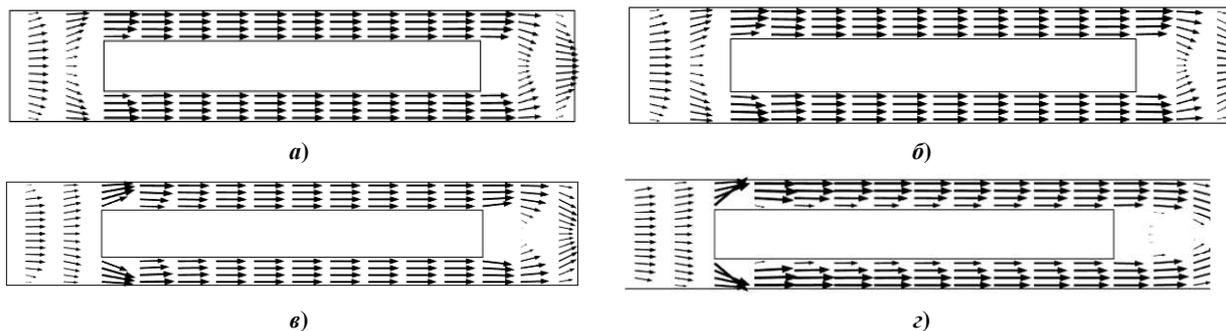


Рисунок 4 – Распределение скорости воздуха при различном расходе  $Q$ :  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (а);  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (б),  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (в);  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (г)

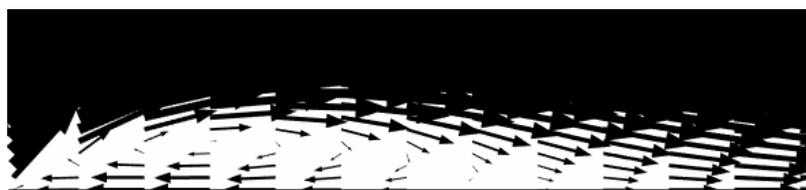


Рисунок 5 – Распределение скорости воздуха в начальной зоне при  $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$

Для устранения эффекта, проиллюстрированного рисунком 5, предлагается разбить границу нагнетания и стока воздуха на две зоны, как показано на рисунке 6.

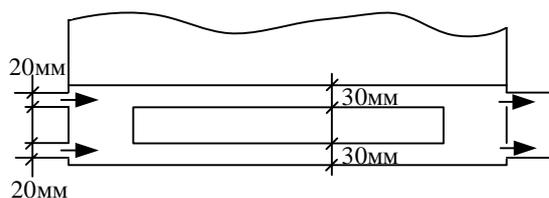


Рисунок 6 – Геометрия моделирования

Для данной геометрии в результате моделирования получено распределение скорости воздушного потока (рис. 7).

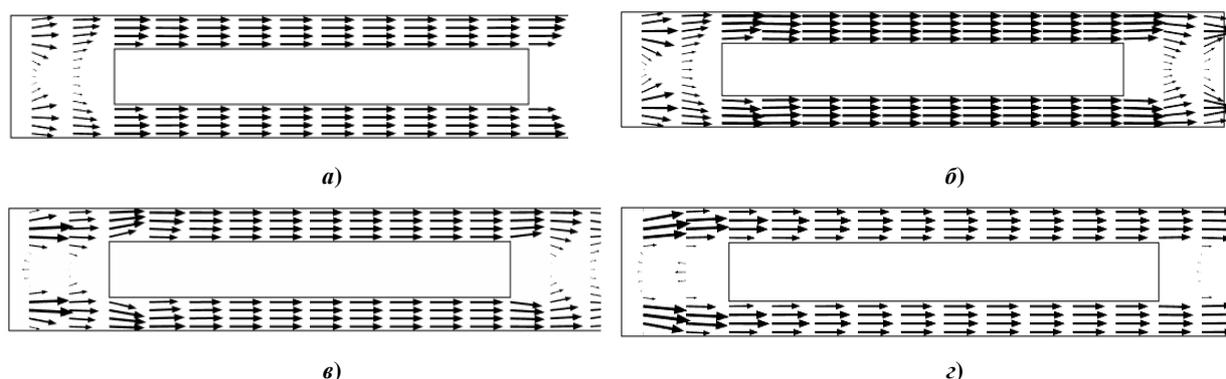
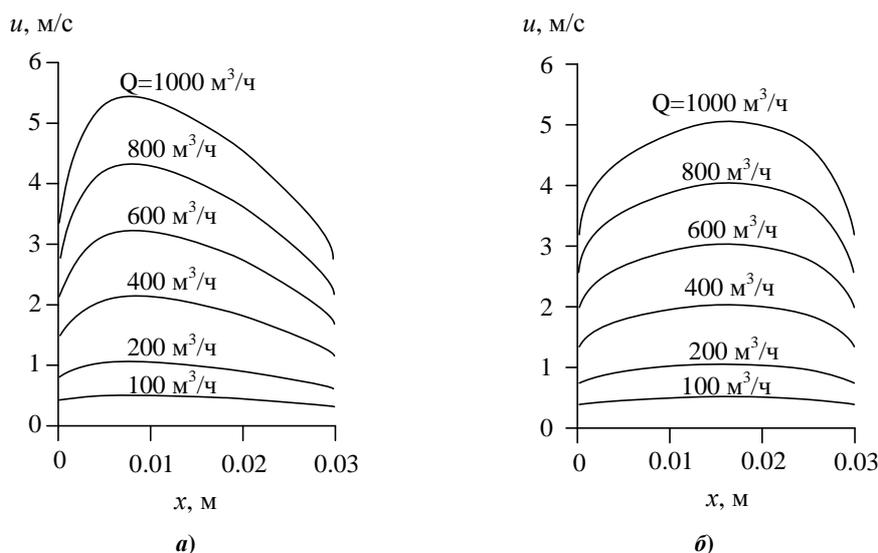


Рисунок 7 – Распределение скорости воздуха при расходе  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (а),  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (б),  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (в),  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (г)

Как видно, принятые конструктивные изменения значительно повысили равномерность движения воздуха у поверхности объекта сушки в широком диапазоне скоростей нагнетаемого воздушного потока.

Для сравнения, на рисунке 8 представлены профили скоростей воздуха над поверхностью объекта сушки в диапазоне расхода  $Q$  от 100 до 1000  $\text{м}^3/\text{ч}$ .



**а** – для геометрии камеры, показанной на рисунке 3; **б** – на рисунке 6

**Рисунок 8** – Распределение скорости воздуха над поверхностью объекта сушки

**Заключение.** В результате проведенного численного моделирования движения воздушного потока в камере сушки на основе законов течения потоков получено распределение скоростей движения воздуха. Для получения равномерного потока вдоль поверхности объекта сушки предложено использовать перегородку из материала, прозрачного к распространению СВЧ-поля, а также разделение области нагнетания и области стока воздуха на два участка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
2. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
3. Методы расчета турбулентных течений / под ред. В. Колльмана. – М.: Мир, 1984. – 464 с.
4. Гинзбург, И.П. Аэрогазодинамика / И.П. Гинзбург. – М.: Высш. шк., 1966. – 404 с.
5. A new  $k - \omega$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – Model development and validation / Т.-Н. Shih [et al.] // Computers fluids. – 1995. – № 24(3). – P. 227–238.
6. Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
7. Durbin, P.A. Statical theory and modeling for turbulent flows / P.A. Durbin, B.A.P. Reif. – United Kingdom: John Wiley and Sons, West Sussex, 2011. – 357 p.
8. Saad, T. Turbulence modeling for beginners / T. Saad // University of Tennessee space institute [Electronic resource]. – 2010. – Mode of access: [http://www.cfd-online.com/W/images/3/31/Turbulence\\_Modeling\\_For\\_Beginners.pdf](http://www.cfd-online.com/W/images/3/31/Turbulence_Modeling_For_Beginners.pdf). – Date of access: 07.11.2015.

Поступила 03.12.2015

#### SIMULATION OF AIR FLOW IN THE DRYING CHAMBER

**A. ADAMOVICH, A. LAPEZO, T. HOMCHENKO**

*The systems of the equations with entry and boundary conditions describing laminar and turbulent flows are given. On the basis of the equations of turbulent flow of air numerical modeling of a stream of air in the drying camera in the wide range of values of a consumption of the air forced in the drying camera is carried out. The results of modeling representing distribution of speeds of an air stream in the camera, profiles of speeds of a stream over object of drying are analysed. Constructive solutions for increase in uniformity of the movement of air at a surface of object of drying are proposed.*

УДК 697.13

**УТИЛИЗАЦИЯ ТРАНСМИССИОННОЙ ТЕПЛОТЫ ПРИ ИНФИЛЬТРАЦИИ ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ВЕНТИЛИРУЕМЫЕ ОКОННЫЕ СТЕКЛОПАКЕТЫ**

*канд. техн. наук, доц. В.И. ЛИПКО; Е.С. ДОБРОСОЛЬЦЕВА; Е.К. СИНЮКОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены материалы теоретических исследований двухслойных и трехслойных вентилируемых стеклопакетов с целью оптимизации теплообменных процессов при нормативной инфильтрации в условиях вынужденной конвекции наружного воздуха внутри межстекольного пространства и его подогрева за счет рекуперации трансмиссионной теплоты.*

**Введение.** Экономное расходование топливно-энергетических ресурсов за счет модернизации технологических процессов во всех сферах экономики, включая и градостроительную, особенно значимо для стран, импортирующих энергоресурсы, среди которых и Республика Беларусь, где 2015 год объявлен годом экономии и бережливости. В связи с этим научные исследования в области энергоресурсосбережения являются приоритетными.

В жилищном строительстве в соответствии с действующей нормативной базой [1] широко распространилась практика проектирования и строительства жилых зданий с естественной вентиляцией, при которой вытяжной вентиляционный воздух удаляется из помещений с максимальным выделением вредных веществ (кухонь, ванных, санузлов) организованно через вытяжные каналы естественным путем за счет сил гравитации, а приточный вентиляционный воздух должен поступать в жилые помещения снаружи за счет инфильтрации через неплотности в наружных ограждающих конструкциях, включая щели притворов заполнения оконных проемов.

Наличие неплотностей и воздухопрускающей способности в наружных ограждающих конструкциях вызвали значительные теплопотери зданий за счет сквозной горизонтальной ветровой продуваемости и вертикальной гравитационной составляющей теплопотерь.

Для снижения безвозвратных теплопотерь с целью энергосбережения в градостроительной отрасли стали широко внедряться воздухо непроницаемые материалы, такие как пластмассы, стекло, металл, бетоны, клеи, герметики, которые значительно ограничивали доступ наружного воздуха за счет инфильтрации внутрь вентилируемых помещений, но особенно обострилась эта проблема с применением оконных стеклопакетов по европейским стандартам с плотными притворами.

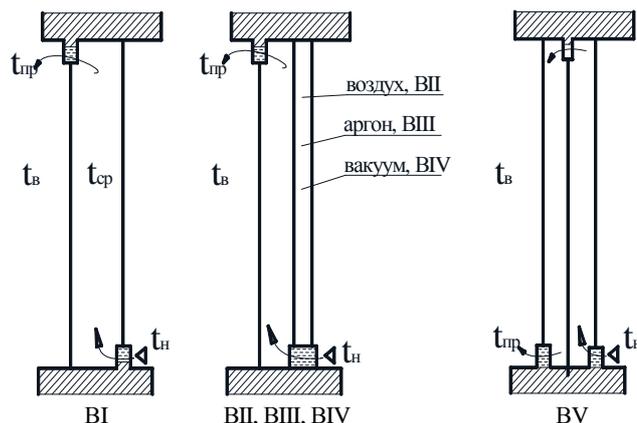
В условиях возникшей практически полной герметизации наружных ограждающих конструкций поступление наружного воздуха неорганизованным путем за счет инфильтрации прекратилось, что вызвало бездействие естественной вентиляции и накопление углекислого газа, неприятных запахов и избыточной влаги внутри жилых помещений, значительно ухудшающих условия проживания. Кроме того, избыточная влага способствует появлению плесени и грибковых образований, разрушающих деревянные конструкции, обои и другие отделочные материалы, а переувлажнение наружных стен приводит к снижению теплозащитных характеристик и увеличению теплопотерь зданием.

Впервые негативные последствия герметизации наружных ограждающих конструкций зданий были исследованы и подробно изложены с указанием путей решения проблемы в 2000 году в работах [2; 3]. Один из вариантов решения разгерметизации наружных ограждений зданий – создание вентилируемых оконных блоков [4] – предложен в 2003 году. Позднее, в 2006 году, аналогичные разработки предложены в работе [5]. В обеих работах представлены конструктивные решения без теоретического обоснования режимных характеристик и эксплуатационных параметров их применения.

С целью разработки методики инженерного расчета инфильтрации приточного воздуха через энергосберегающие вентилируемые окна необходимо выполнить построение физической и математической моделей процессов рекуперативного теплообмена при переменных наружных температурах.

**Построение физических и математических моделей и методики расчета рекуперативного теплообмена в вентилируемых оконных стеклопакетах различного конструктивного исполнения.** Рассмотрим несколько вариантов рекомендуемых к внедрению в практику градостроительства вентилируемых оконных стеклопакетов, представленных схематично на рисунке 1 (инфильтрация в межстекольном пространстве показана стрелками).

По мере перемещения наружного воздуха в межстекольном пространстве оконного стеклопакета он нагревается за счет трансмиссионной теплоты, теряемой через остекленную поверхность. Интенсивность нагрева наружного воздуха зависит от множества факторов, но основными являются количество нагреваемого воздуха  $L_{np}$  и его начальная температура  $t_n$ .



**VI** – двухслойный вентилируемый стеклопакет;  
**VII** – трехслойный вентилируемый стеклопакет с воздушной прослойкой;  
**VIII** – трехслойный вентилируемый стеклопакет с инертным газом аргоном;  
**IX** – трехслойный вентилируемый стеклопакет с вакуумным исполнением;  
**X** – трехслойный вентилируемый стеклопакет

**Рисунок 1** – Варианты рекомендуемых к внедрению в практику градостроительства вентилируемых оконных стеклопакетов

Физическую картину тепломассообменных процессов и построение математической модели рекуперативного теплообмена подробно рассмотрим для варианта VI конструктивного исполнения простейшего вентилируемого двухслойного стеклопакета.

В соответствии с действующей нормативной базой [5] необходимое количество наружного воздуха для создания комфортного микроклимата в жилых помещениях зависит от площади пола  $F_n$  вентилируемого естественным путем жилого помещения и определяется как

$$L_{np} = 3F_n, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где 3 – нормативный воздухообмен,  $\text{м}^3/\text{ч}\cdot\text{м}^2$ .

Наружная температура воздуха  $t_n$  за отопительный период для климатических условий Беларуси изменяется от  $t_n = +5^\circ\text{C}$  до  $t_n = -30^\circ\text{C}$  и ниже.

Температура воздуха внутри жилых помещений поддерживается стабильно за счет бытовых теплоступлений и работы системы отопления в пределах  $t_g = +18\dots 20^\circ\text{C}$ .

Фактические трансмиссионные потери теплоты через оконный стеклопакет определяются по формуле

$$Q_{ок} = K_{ок} \cdot F_{ок} \cdot (t_g - t_n) \cdot n, \quad (1)$$

где  $K_{ок} = 1/R_{ок}$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $F_{ок}S$  – площадь поверхности остекления,  $\text{м}^2$ ;  $n$  – коэффициент уменьшения расчетной разности температур, для вертикальных ограждений  $n = 1$ ;  $R_{ок}$  – термическое сопротивление ограждающей конструкции,  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ .

Величина термического сопротивления  $R$  определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha_g} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (2)$$

где  $\alpha_g = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  – коэффициент тепловосприятия от внутреннего воздуха к внутренней поверхности ограждения;  $\delta$  – толщина единичного слоя остекления, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала остекления,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения наружному воздуху.

При построении физической модели процессов теплообмена при инфильтрации наружного воздуха через двухслойный стеклопакет примем следующие допущения:

- температура воздуха  $t_{cp}$  в межстекольном пространстве равна средней температуре входящего и выходящего воздуха;
- температура внутреннего воздуха  $t_g$  постоянная за счет автоматического регулирования системы отопления;
- наружная температура  $t_n$  изменяется в пределах отопительного периода;
- толщина каждого из слоев остекления стеклопакета  $\delta = 0,005 \text{ м}$ .

Тогда согласно (2) величина  $R$  определится как

$$R_{ок} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,005}{0,76} + \frac{0,005}{0,76} + \frac{1}{23} = 0,1716, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт},$$

соответственно

$$K_{ок} = \frac{1}{0,1716} = 5,83, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Для внутреннего остекления количество теплоты  $Q'_{ок}$  определится из выражения (1):

$$Q'_{ок} = 5,83 \cdot F_{ок} \cdot (t_g - t_{см}), \quad (3)$$

а для внешнего остекления  $Q''_{ок}$  равно

$$Q''_{ок} = 5,83 \cdot F_{ок} \cdot (t_{см} - t_n). \quad (4)$$

Суммарная теплота  $Q_{ок}$ , теряемая через двойное остекление, определится как

$$Q_{ок} = Q'_{ок} + Q''_{ок} = 5,83 \cdot F_{ок} \cdot t_g - 5,83 \cdot F_{ок} \cdot t_{см} + 5,83 \cdot F_{ок} \cdot t_{см} - 5,83 \cdot F_{ок} \cdot t_n.$$

Количество теплоты, затраченной на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха, определится по формуле:

$$Q_{инф} = 0,28 L_{np} \cdot \rho \cdot c (t_{np} - t_n), \text{ Вт}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ; 0,28 – коэффициент перевода киллоджоулей в ватты.

Если предположить, что вся трансмиссионная теплота затрачивается на нагрев наружного воздуха, то вполне очевидно равенство

$$Q_{ок} = Q_{инф}, \quad (6)$$

то есть при  $L_{np} = 3F_n$  имеем  $5,83F_{ок}(t_g - t_n) = 0,28 \cdot 3 \cdot F_n \cdot 1,4 \cdot (t_{np} - t_n)$ , а после преобразования получим

$$5,83F_{ок}t_g = 1,176F_n t_{np} + (5,83F_{ок} - 1,176F_n)t_n. \quad (7)$$

Уравнение (1) будем решать относительно  $t_{np}$  при переменных значениях  $t_n$  и фиксированных значениях  $t_g, F_{ок}, F_n$ .

В расчетах температуру внутреннего воздуха примем постоянной и равной  $t_g = +20$  °С, а для параметров  $F_{ок}$  и  $F_n$  рассмотрим несколько вариантов соотношения их значений.

Для значений  $F_{ок} = 2 \text{ м}^2$  и  $F_n = 10 \text{ м}^2$  уравнение (7) примет вид

$$5,83 \cdot 2 \cdot 20 = 1,176 \cdot 10 \cdot t_{np} + (5,83 \cdot 2 - 1,176 \cdot 10) \cdot t_n, \\ 233,2 = 11,76t_{np} - 0,1t_n. \quad (8)$$

Расчеты температуры  $t_{np}$  инфильтрующегося наружного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты выполнены по уравнению (8) при различных вариантах соотношения расчетных параметров  $F_{ок}$  и  $F_n$ , а их результаты сведены в таблицу, по которым созданы графики зависимости величины температуры  $t_{np}$  приточного воздуха от первоначальной наружной температуры  $t_n$  при переменных режимах теплообмена (рис. 2).

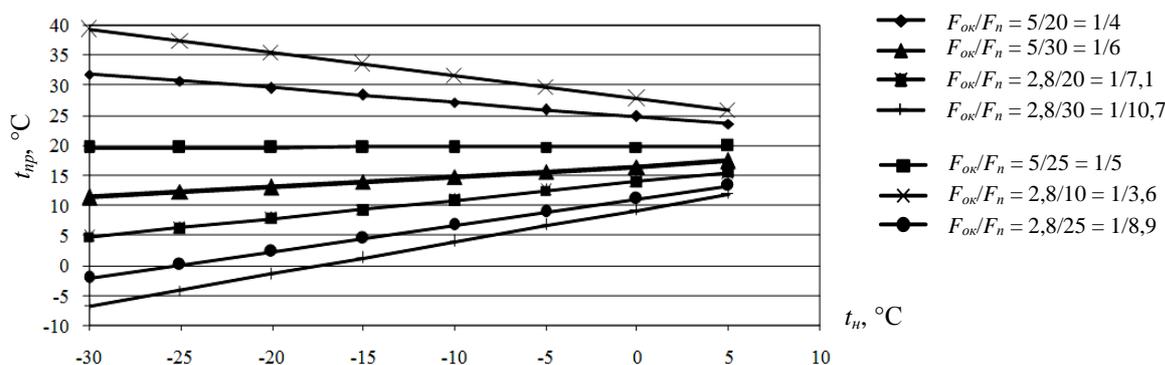
По аналогичной методике построены математические модели для других рассматриваемых вариантов: VII; VIII; XIV; XV различного конструктивного исполнения заполнения световых проемов зданий, которые представлены графическими зависимостями на рисунках 3–6.

Анализ результатов выполненных исследований показывает, что на режим теплообменных процессов, протекающих в вентилируемом оконном стеклопакете, существенное влияние оказывают конструктивно-планировочные решения в виде соотношения  $F_{ок}/F_n$  при инфильтрации наружного воздуха с его подогревом за счет трансмиссионной теплоты, теряемой отапливаемым помещением через остекленные поверхности оконных стеклопакетов.

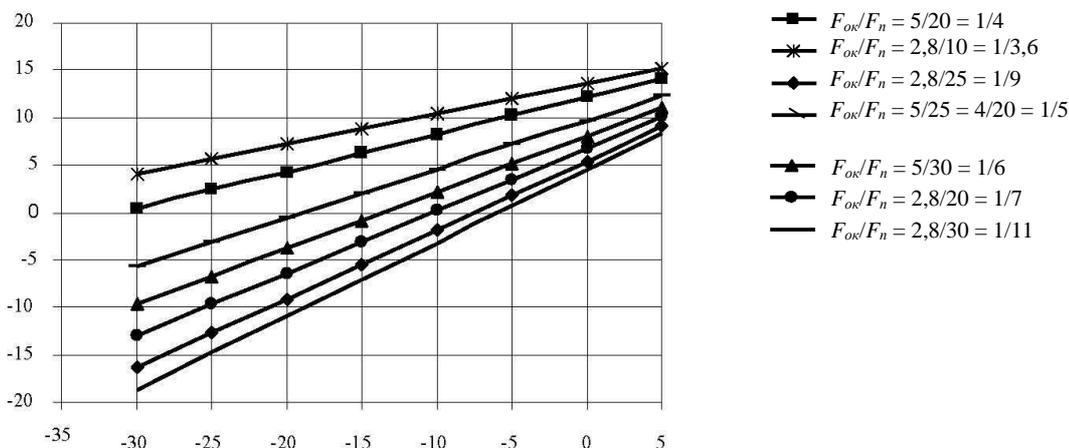
**Результаты исследований интенсивности нагрева приточного наружного воздуха при инфильтрации через оконный стеклопакет при различных соотношениях конструктивных параметров  $F_{ок}/F_n$  и переменных наружных температурах  $t_n$**

$t_n, ^\circ\text{C}$	$F_{ок} = 5 \text{ м}^2$			$F_{ок} = 2,8 \text{ м}^2$				$F_{ок} = 4 \text{ м}^2$	$F_{ок} = 2 \text{ м}^2$
	$F_n = 20 \text{ м}^2$	$F_n = 25 \text{ м}^2$	$F_n = 30 \text{ м}^2$	$F_n = 10 \text{ м}^2$	$F_n = 20 \text{ м}^2$	$F_n = 25 \text{ м}^2$	$F_n = 30 \text{ м}^2$	$F_n = 20 \text{ м}^2$	$F_n = 10 \text{ м}^2$
	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$
+5	23,6	19,9	17,4	25,8	15,4	13,3	11,9	19,9	19,87
0	24,8	19,8	16,5	27,8	13,9	11,1	9,2	19,8	19,83
-5	25,9	19,78	15,6	29,7	12,4	8,9	6,6	19,78	19,78
-10	27,2	19,7	14,8	31,6	10,8	6,7	3,9	19,7	19,74
-15	28,4	19,7	13,9	33,6	9,3	4,5	1,2	19,7	19,7
-20	29,6	19,65	13,0	35,5	7,8	2,3	-1,5	19,66	19,66
-25	30,8	19,6	12,2	37,4	6,2	0,05	-4,2	19,6	19,6
-30	31,9	19,57	11,3	39,4	4,7	-2,1	-6,8	19,57	19,57

На рисунках 2–6 эта зависимость  $t_{np}$  от  $t_n$  легко просматривается по соотношениям  $F_{ок}/F_n$ . При значениях  $F_{ок}/F_n = 1/5$  температуры  $t_{np}$  приточного воздуха, инфильтрующегося через оконные стеклопакеты, приближаются к температуре  $t_e$  внутреннего воздуха и не вызывают ни нагрева, ни охлаждения воздуха внутри отапливаемых помещений, способствуя стабилизации теплового режима жилых помещений, а теплопотери через окно полностью исключаются.



**Рисунок 2 – Интенсивность нагрева приточного наружного воздуха  $t_{np}$  за счет рекуперативного теплообмена двухслойного вентилируемого оконного стеклопакета при инфильтрации в зависимости от соотношения  $F_{ок}/F_n$  и в соответствии с действующей нормативной базой теплотехнического расчета наружных ограждений**



**Рисунок 3 – Интенсивность нагрева приточного наружного воздуха  $t_{np}$  за счет рекуперативного теплообмена трехслойного вентилируемого оконного стеклопакета при инфильтрации в зависимости от соотношения  $F_{ок}/F_n$  и в соответствии с действующей нормативной базой теплотехнического расчета наружных ограждений с воздушной прослойкой**

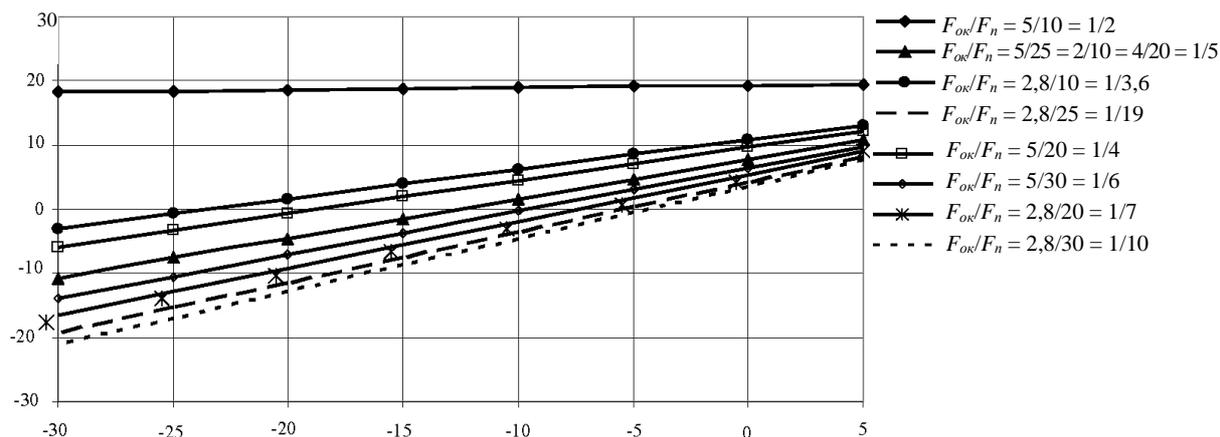


Рисунок 4 – Интенсивность нагрева приточного наружного воздуха  $t_{np}$  за счет рекуперативного теплообмена трехслойного вентилируемого оконного стеклопакета при инфильтрации в соответствии с действующей нормативной базой теплотехнического расчета наружных ограждений с инертным газом аргоном

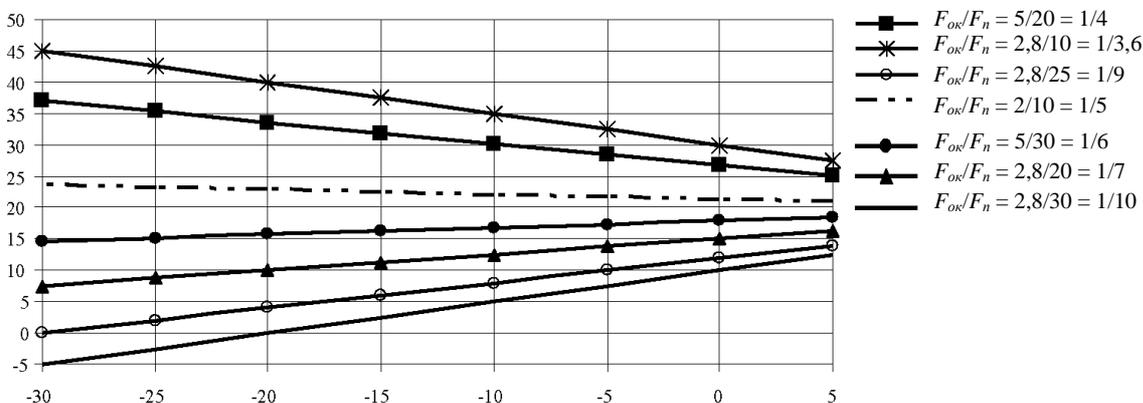


Рисунок 5 – Интенсивность нагрева приточного наружного воздуха  $t_{np}$  за счет рекуперативного теплообмена трехслойного вентилируемого оконного стеклопакета при инфильтрации в соответствии с действующей нормативной базой теплотехнического расчета наружных ограждений с вакуумным исполнением

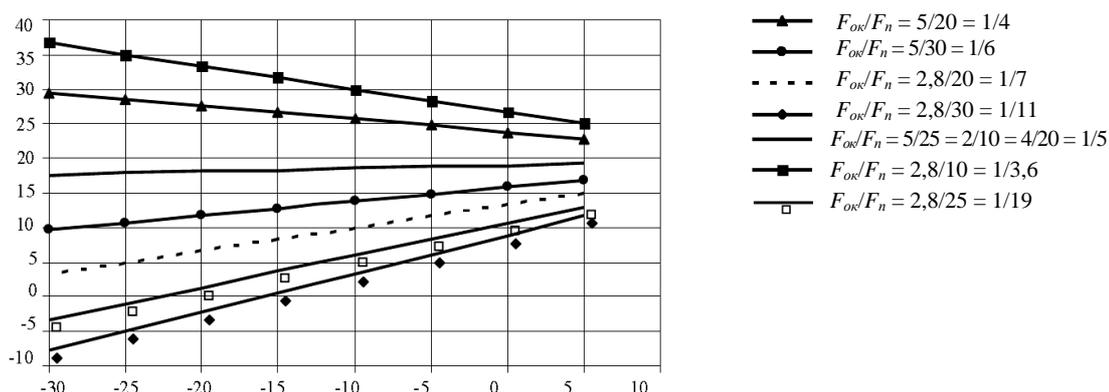


Рисунок 6 – Интенсивность нагрева приточного наружного воздуха  $t_{np}$  за счет рекуперативного теплообмена трехслойного вентилируемого оконного стеклопакета при инфильтрации в соответствии с действующей нормативной базой теплотехнического расчета наружных ограждений

На снижение отопительной нагрузки существенное влияние оказывает в дневное время также прямая и рассеянная солнечная радиация, которая воздействует на стеклопакет снаружи и поднимает температуру инфильтрующегося наружного воздуха за счет так называемого парникового эффекта.

**Заключение.** Анализ и обобщение результатов выполненных исследований дает основание для вывода основных положений теории теплообмена при инфильтрации наружного воздуха через вентилируемый оконный стеклопакет.

1. При проектировании жилых зданий необходимо использовать энергоэффективные вентилируемые оконные стеклопакеты, которые работают в режиме рекуперативного теплообменника пластинчатого типа с утилизацией трансмиссионной теплоты, теряемой отапливаемым помещением, для нагрева инфильтрующегося наружного воздуха в межстекольном пространстве стеклопакета.

2. По теплотехническим показателям соотношение площади вентилируемого оконного стеклопакета  $F_{ок}$  к площади пола  $F_n$  отапливаемого помещения должно быть  $F_{ок}/F_n \geq 1/5$ , так как при этом полностью исключаются теплотери через окна и снижается нагрузка на систему отопления.

3. Ориентация здания должна быть обращена коротким фасадом на север для большего использования природной составляющей солнечной радиации с целью дополнительного подогрева инфильтрующегося наружного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты, расположенные на фасадах здания, освещаемых солнцем.

Сравнительный анализ выполненных исследований по оценке эффективности рекуперативного теплообмена при инфильтрации приточного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты различного конструктивного исполнения показал, что наиболее эффективно и интенсивно нагревается наружный воздух через двухслойный VI, трехслойный BV и трехслойный с вакуумированием межстекольного пространства CIV стеклопакеты. По теплотехническим показателям три варианта близки, но сложность в изготовлении и повышенный расход исходных материалов для трехслойных стеклопакетов предпочтительнее отдадут двухслойному стеклопакету VI, что экономически обосновано и простотой конструктивного исполнения, и сравнительно умеренным холодным климатом Беларуси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01-03: Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2004.
2. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий / В.И. Липко. Т. 1. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
3. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий / В.И. Липко. Т. 2. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.
4. Приточный вентиляционный оконный блок: пат. 947 Респ. Беларусь, МПК (2002) E06B7/02, 7/10 / В.И. Липко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № 420020379; заявл. 04.12.2002; опубл. 30.09.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2003.
5. Юрков, О. Эффективный способ сокращения теплотерь через окна многоэтажных жилых зданий / О. Юрков // Строительная наука и техника. – 2006. – № 5(8).

Поступила 10.09.2015

#### UTILIZATION OF TRANSMISSION WARMTH AT INFILTRATION ARRIVING AIR THROUGH VENTILATED GLAZED WINDOWS

V. LIPKO, E. DOBROSOLTSEVA, E. SINUKOVICH

*Materials of theoretical researches of two-layer ventilated double-glazed windows are presented in article for the purpose of optimization heatexchange processes at a standard infiltration in the conditions of the compelled convection external air in interglass space and its heating at the expense of recovery transmission warmth.*

УДК 621.644.07

**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНОК  
(Полоцкий государственный университет);  
С.С. ВАБИЩЕВИЧ  
(БелНИПИнефть, Гомель)*

*Рассматривается возможность изменения пространственного положения магистральных трубопроводов под воздействием природных геологических, инженерно-геологических, эксплуатационных и антропогенных процессов. Определяются основные процессы взаимного влияния природных, эксплуатационных и антропогенных воздействий на трубопроводную систему Республики Беларусь. Анализируется пространственное расположение магистральных трубопроводов относительно других инженерных сетей и коммуникаций, естественных и искусственных препятствий. Представлены примеры изменения планово-высотного положения магистрального трубопровода с учетом опыта проектирования, сооружения и эксплуатации, а также существующей нормативно-правовой базы, действующей в области магистрального трубопроводного транспорта на территории Республики Беларусь. Определен наиболее опасный вариант изменения пространственного положения магистрального трубопровода. Сделан вывод о необходимости разработки и совершенствования методов ликвидации недостаточного заглубления магистрального трубопровода.*

В современных условиях трубопроводные транспортные системы, обладая рядом преимуществ (экономических, экологических и др.) по сравнению с другими способами транспортировки, являются основным способом доставки нефти и газа от мест их добычи до потребителя [1]. Это обуславливает проявление в последние десятилетия интереса ученых, исследователей и инженеров к проблематике трубопроводного транспорта [1–19].

Уровень надежности магистральных трубопроводов обеспечивается как на этапе их проектирования и строительства, так и в период эксплуатации. Однако для действующего трубопровода возможны отклонения эксплуатационных параметров от проектных, связанные с изменением его пространственного местоположения в результате взаимодействия с окружающим грунтом. Возникающие при этом напряженно-деформационные изменения способны привести к аварийным ситуациям, что влечет значительный материальный ущерб и губительно воздействует на окружающую среду.

Обеспечение эксплуатационной и экологической безопасности подземных магистральных трубопроводов, проложенных в сложных инженерно-геологических условиях, – первоочередная задача трубопроводного транспорта. Магистральные трубопроводы, являясь линейно-протяженными объектами, имеют ряд характерных особенностей, связанных с неизбежным пересечением районов с активными проявлениями грунтовых изменений, естественных и искусственных препятствий. В результате совокупного действия природных геологических и инженерно-геологических процессов нефтепровод деформируется вместе с грунтом. Особую, иногда непредсказуемую опасность для трубопровода представляет пучение грунта. Расчет сил пучения и связанных с ними деформаций земной поверхности, оценка его влияния на прочность и надежность трубопровода, на долговечность его конструктивных элементов – сложные инженерные задачи. В районах площадного пучения грунта должны быть предусмотрены специальные меры против деформаций трубопровода, если развитие опасного геологического процесса создает угрозу сооружению срока его эксплуатации [14].

**Основная часть.** Проблема надежности эксплуатационных характеристик трубопроводных систем, в частности оценка изменения их положения под влиянием природных и эксплуатационных процессов, для Республики Беларусь, являющейся транзитной страной по доставке нефтегазового сырья в Европу, – весьма актуальна [20].

По территории Республики Беларусь трассы магистральных нефте- и продуктопроводов проложены в 6 технических коридорах общей протяженностью 1233 км. Общая протяженность всех магистральных нефтепроводов в одноконтурном исчислении составляет около 4000 км.

Для магистральных нефтепроводов, проложенных в северной и северо-восточной части республики (Унеча – Полоцк, Полоцк – Скрудалиена, Полоцк – Мажейкяй и Сургут – Полоцк), характерно большое разнообразие ландшафтов, комплексность почвенного покрова и наличие значительного количества

водных объектов. Магистральные нефтепроводы Унеча – Мозырь, Мозырь – Брест и Мозырь – Броды проложены в южной части республики, которой присуще однообразие ландшафтов [21].

Республика Беларусь обладает развитой системой магистральных газопроводов. По территории страны проходит три транзитных магистральных газопровода и строится новый «Ямал – Европа».

В настоящее время поставку газа в республику и его транзит в третьи государства осуществляет ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Газотранспортная система Республики Беларусь включает в себя газопроводы следующей протяженности:

- 6983 км в одноконтинентальном исчислении;
- 2821 км магистральных газопроводов;
- 4162 км газопроводов-отводов и распределительных сетей низкого давления.

В качестве вспомогательных структур в системе газоснабжения Беларуси имеется:

- 6 линейных компрессорных станций и 16 компрессорных цехов общей мощностью 640,6 МВт;
- 2 подземных хранилища газа с компрессорными станциями мощностью 9,1 МВт;
- 223 газораспределительные станции;
- 6 газоизмерительных станций;
- 24 автомобильные газонаполнительные компрессорные станции [22; 23].

Ежегодно ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» осуществляет комплекс мер по диагностике, обслуживанию и реконструкции объектов газотранспортной системы, автоматизации и телемеханизации производственных процессов, что способствует их надежному и устойчивому функционированию. Надежность и безопасность эксплуатации объектов магистральных газопроводов определяется комплексным подходом, основанным на взаимосвязи таких факторов, как обеспечение качества проектных работ, обеспечение качества строительства, организация системы в эксплуатации объектов. Экологическая политика ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» предусматривает создание системы экологического менеджмента, которая должна обеспечивать динамическое экологическое развитие предприятия при условии рационального использования природных ресурсов и сохранении благоприятной окружающей среды [22]. При этом следует отметить, что фактический срок эксплуатации большинства магистральных трубопроводов в Республике Беларусь приближается к тому периоду, когда значительно возрастает интенсивность отказов и аварий. По мере увеличения возраста трубопроводов усиливается тенденция к снижению их надежности и повышению вероятности аварий. Старение трубопроводов сопровождается как изменением пространственного положения самого трубопровода под действием эксплуатационных воздействий, так и изменением ландшафта вследствие естественных и антропогенных воздействий.

Согласно современным представлениям, как показывает практика, проблему устойчивости магистрального трубопровода необходимо решать не только на стадии строительства, но и в период эксплуатации при нарушении проектного положения участков магистрального трубопровода или при повторной их укладке на болотистых и обводненных участках трассы. Приведение таких участков в проектное положение зачастую является более сложной задачей, чем укладка магистрального трубопровода на стадии строительства, из-за ряда возникающих специфических организационно-технических вопросов. Основной из них – достоверная оценка несущей способности участков действующих магистральных трубопроводов, находящихся в эксплуатации до 30 и более лет, с целью применения безвырезной технологии ремонта.

В настоящее время инженерами-проектировщиками преимущественно используется консервативный подход при выборе методов прокладки и средств закрепления магистральных трубопроводов, ориентированный на замену труб, вырезаемых из участков, находящихся в непроектном положении. Последующее закрепление этих участков в траншее выполняется, как правило, материалоемкими и жесткими балластирующими конструкциями, чаще всего железобетонными утяжелителями, ненадежными при эксплуатации в обводненных слабонесущих грунтах с периодическим оттаиванием и промерзанием.

Известно, что одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность подземных трубопроводов, является их взаимодействие с окружающими грунтами. При этом воздействие со стороны грунта может иметь различный характер: силовой, тепловой, влажностный, химический, коррозионный, биологический и другие.

Трубопроводная система также способна оказывать влияние на окружающий грунт посредством постоянно действующей нагрузки (вес трубы, давление и т.д.) либо переменных нагрузок, обусловленных продольной силой в трубопроводе и изменением температуры и давления перекачиваемого продукта по длине трубопровода.

Следует отметить, что на стадии создания проекта подземных трубопроводов в основном учитывается только постоянное воздействие трубопровода на грунт, в то время как воздействие переменной составляющей учитывается не всегда либо в заметно меньшей степени. Однако как в сложных климати-

ческих, гидрогеологических либо геокриологических условиях не менее важным становится учет и переменных нагрузок при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных трубопроводов.

Существенное влияние на различные виды взаимодействия трубопроводов с грунтами оказывают следующие природные процессы [15]:

- промерзание талых грунтов в холодный период времени года;
- динамика изменения толщины снежного покрова в этот же период;
- оттаивание мерзлых грунтов в теплый период времени;
- скорость и интенсивность паводковых явлений при таянии снега;
- характер и направление движения паводковых вод;
- осадки в виде дождя в теплый период времени;
- изменение уровня грунтовых вод.

Такие эксплуатационные процессы, как изменение рабочего давления, объём перекачиваемой жидкости, температурный режим, изменение свойств перекачиваемых продуктов, оказывают влияние на характер взаимодействия грунтов с подземным трубопроводом и могут приводить к изменению его пространственного положения. Возникающие при этом дополнительные продольные напряжения изгиба могут вызывать перестройку напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода с уменьшением его эксплуатационной надежности и долговечности [15].

Помимо увеличения напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода и усиления уровня напряжений в его стенке потенциально опасным для безаварийной эксплуатации магистрального трубопровода при изменении его планово-высотного положения является сближение фактического положения магистрального трубопровода с другими сферами хозяйственной деятельности человека.

Являясь линейно-протяженными объектами, магистральные трубопроводы пересекают разнообразные естественные и искусственные препятствия, сельскохозяйственные земли и т.д. Любое изменение их положения в пространстве относительно трубопроводной системы влечёт изменение степени взаимодействия, рисков и взаимного влияния. Для наглядности рассмотрим несколько примеров.

**Пример 1.** *Пересечение магистрального трубопровода с различными инженерными сетями и сооружениями, естественными препятствиями.*

Опираясь на опыт проектирования, сооружения и эксплуатации магистральных трубопроводов, а также резюмируя существующую нормативно-правовую базу, действующую в области магистрального трубопроводного транспорта на территории Республики Беларусь, можно с уверенностью заключить, что при пересечении с различными инженерными сетями и сооружениями магистральные трубопроводы прокладываются, как правило, ниже пересекаемых коммуникаций. При переходе естественных препятствий устраиваются ниже отметок, обеспечивающих эксплуатационную и экологическую безопасность пересекаемого открытого водотока, оврага и др. [20; 24–28].

**Пример 2.** *Расположение магистрального трубопровода на землях с интенсивной хозяйственной деятельностью человека.*

Следует отметить, что существующая нормативно-правовая база, действующая в области магистрального трубопроводного транспорта на территории Республики Беларусь, строго лимитирует минимальные значения заглубления трубопровода в зависимости от типа земельных угодий. При этом при проектировании и сооружении магистральных трубопроводов необходимо учитывать возможные изменения назначения земельных участков, их перевод из одной категории в другую. Данная необходимость возникает вследствие того, что объекты магистрального трубопроводного транспорта эксплуатируются на протяжении десятилетий.

Таким образом, прокладка трубопровода по землям лесного фонда и в целом по землям, предусматривающим хозяйственную деятельность человека, возникает необходимость обеспечить заглубление трубопровода, которое бы не допускало его повреждение техникой и механизмами в процессе многолетней эксплуатации [20; 24–28].

Из вышесказанного следует, что изменение пространственного положения трубопровода, в особенности недостаточное его заглубление, влечет за собой увеличение эксплуатационных и экологических рисков как для трубопровода, так и для окружающей среды. С другой стороны, опыт эксплуатации трубопроводов показывает, что отдельные участки, имеющие отклонения от проектного положения, могут находиться в работоспособном состоянии длительное время. В связи с этим особую значимость приобретает мониторинг технического состояния магистральных трубопроводов.

**Заключение.** Следует отметить, что в настоящее время и в ближайшие десятилетия обеспечение эксплуатационной надежности линейной части подземных трубопроводов будет оставаться сложной научной и инженерной проблематикой. Решение этого круга вопросов особенно актуально для районов с экстремальными климатическими и сложными гидрогеологическими и геокриологическими условиями,

вызывающими изменения пространственного положения трубопровода с увеличением уровня механических напряжений в его стенке.

Проведенный анализ изменения пространственного положения магистрального трубопровода показал, что под воздействием эксплуатационных нагрузок и их изменений, а также природных и антропогенных процессов трубопровод способен менять своё положение как по абсолютным отметкам, так и относительно естественных и искусственных препятствий и поверхности Земли. Для магистральных трубопроводов, расположенных на территории Республики Беларусь, наибольшую опасность представляет изменение напряженно-деформированного состояния в стенке трубы в совокупности с приближением тела трубы к естественным, искусственным препятствиям и зоне хозяйственной деятельности человека.

Таким образом, результаты оценки изменения пространственного положения магистральных трубопроводов указывают на необходимость разработки и совершенствования методов ликвидации недостаточного заглубления магистрального трубопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бородавкин, П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство) / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
2. Бородавкин, П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1976. – 280 с.
3. Бородавкин, П.П. Сооружение магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин. – М.: Недра, 1977. – 407 с.
4. Быков, Л.И. Оценка напряженно-деформированного состояния сложных участков трубопроводов / Л.И. Быков, В.Ю. Шувалов // Сб. науч. тр.; ред. кол. А.М. Шаммазов [и др.]. – Уфа: УГНТУ, 2001. – С. 309–312.
5. Виноградов, С.В. Влияние основания на напряженно-деформированное состояние подземной трубы / С.В. Виноградов // Расчет сооружений, взаимодействующих с окружающей средой. – М., 1984. – С. 24–29.
6. Виноградов, С.В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки / С.В. Виноградов – М.: Стройиздат, 1980. – 135 с.
7. Горковенко, А.И. Динамика продольных перемещений газопровода в область аркообразования / А.И. Горковенко // Изв. вузов «Нефть и газ». – Тюмень: ТюмГНГУ, – 2006. – № 4. – С. 96–100.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com>.
9. Бердник, М.М. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей / М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агинеи // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2011. – № 1. – С. 22–26.
10. Методы оценки эксплуатационной работоспособности труб технологических трубопроводов / А.Я. Яковлев [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. И.Ю. Быкова. – М.: Центр ЛитНефтеГаз. – 2008. – 272 с.
11. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В.В. Харионовский. – М.: Недра, 2000. – 464 с.
12. Харионовский, В.В. Надежность магистральных газопроводов: современное состояние / В.В. Харионовский // Наука и техника в газовой промышленности. – 2007. – № 3. – С. 4–3.
13. Харионовский, О.В. Мониторинг объектов линейной части магистральных газопроводов / О.В. Харионовский // Территория Нефтегаз. – 2009. – № 4. – С. 22–30.
14. Хабибуллин, Ф.Х. Влияние температурного фактора на эксплуатационную надежность трубопроводов в условиях слабонесущих грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Ф.Х. Хабибуллин; ТюмГНГУ. – Тюмень, 2001. – 23 с.
15. Горковенко, А.И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.19 / А.И. Горковенко. – Тюмень, 2006. – 305 с.
16. Юрченко, А.А. Методика оценки пространственного положения трубопровода в условиях пучинистых грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / А.А. Юрченко. – Уфа, 2011. – 27 с.
17. Колосова, А.Л. Разработка системы мониторинга коррозионной стойкости линейной части магистральных газопроводов на основе теории нечеткой логики: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / А.Л. Колосова. – Тюмень, 2012. – 135 с.

18. Иванов, И.А. Эксплуатационная надежность магистральных трубопроводов в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.19 / И.А. Иванов. – Тюмень, 2012. – 267 с.
19. Нагимов, Р.М. Снижение опасностей эксплуатации подводных трубопроводов при наличии оголенных и провисающих участков: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19, 05.26.03 / Р.М. Нагимов. – Уфа, 2004. – 115 с.
20. О магистральном трубопроводном транспорте: Закон Респ. Беларусь от 9 янв. 2002 г. № 87-3: с изм. и доп. от 08.07.2008 № 367-3 // Национальный реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2008. – № 170, 2/1464.
21. Защита водных объектов при аварийных разливах нефти / Д.П. Комаровский [и др.]; под ред. В.К. Липского. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 220 с.
22. [Электронный ресурс.] – Режим доступа: <http://belarus-tr.gazprom.ru/about>.
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2003/46/sn34610.html>.
24. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85.
25. Строительство магистральных нефтепроводов. Технология и организация: ТКП 414-2012. – Дата введения: 17.12.2012. – 56 с.
26. Строительство магистральных нефтепроводов. Подводные переходы: ТКП 418-2012. – Дата введения: 26.12.2012. – 64 с.
27. Строительство магистральных нефтепроводов. Конструкция и балластировка: ТКП 419-2012. – Дата введения: 26.12.2012. – 36 с.
28. Нефтепроводы магистральные. Нормы технологического проектирования: ТКП 422-2012. – Дата введения: 26.11.2012. – 56 с.

Поступила 08.10.2015

## ASSESSMENT OF CHANGES IN THE SPATIAL POSITION OF THE MAIN PIPELINES

*L. SPIRIDENOK, S. VABISHCHEVICH*

*Here is an analysis of the possibility of changing the spatial position of pipelines under the influence of natural-geological, engineering-geological, operational and anthropogenic processes. The basic processes of mutual influence of natural, operational and human impacts on the pipeline system of the Republic of Belarus are identified. The analysis of the spatial arrangement of pipelines relative to other engineering systems and communications, natural and artificial obstacles was made. Here you can find some examples of changes in height position of the main pipeline with consideration of experience in the design, construction and operation of pipelines, as well as the existing legal framework, operating in the field of main pipeline transport in the territory of the Republic of Belarus. The most dangerous option of change in the spatial position of the main pipeline was identified. The necessity of developing and improving methods for liquidation of insufficient penetration of the main pipeline was showed.*

УДК 628.1.16(477+476.5)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ ВОДЫ ПРИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ**

*д-р техн. наук, проф. В.О. ОРЛОВ; канд. техн. наук, доц. А.М. ОРЛОВА  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Украина);  
канд. техн. наук, доц. Д.П. КОМАРОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты многолетних исследований процесса обезжелезивания на действующих станциях Украины и Беларуси. Исследования проводились на фильтрах с песчаной, щебеночной и пенополистирольной плавающей загрузках. Обосновывается, что при обезжелезивании подземных вод с малой концентрацией железа важно обеспечить достаточную аэрацию воды до поступления ее в загрузку, в которой процесс задержания гидроксида железа проходит идентично во всех приведенных типах загрузок.*

В системах водоснабжения населенных пунктов Украины, Беларуси и других стран мира важное место занимают сооружения подготовки воды. Стоимость таких сооружений достаточно высокая и это может быть решающим фактором при обосновании всей системы водоснабжения. В таком случае наиболее целесообразно использовать подземные источники с небольшим содержанием железа, которое чаще всего удаляется из воды интенсивной аэрацией и фильтрованием через разного типа сыпучие материалы [1–7].

Подземные воды водоносных горизонтов отдельных областей Украины: Хмельницкой (с. Плужное); Винницкой (г. Шепетовка, с. Бохонники, с. Новые Обиходы); Ровенской (Новый Двор, с. Горбаков, Франивка, Терентиив, Деревяне, Грабов, п. г. т. Гоша), а также Беларуси (г. Полоцк) характеризуются содержанием железа до 2,5 мг/дм<sup>3</sup>, присутствием сероводорода, марганца, избыточной углекислоты, достаточно высокими значениями водородного показателя и щелочности [4; 6–7]. Одним из наиболее простых, недорогостоящих и распространенных методов обезжелезивания является безреагентный метод, основанный на упрощенной аэрации с последующим фильтрованием, или контактным обезжелезиванием воды [6; 7] при высоких значениях рН и щелочности. При этом предусматривается подача аэрированной воды сразу на фильтры без предварительного ее отстаивания. По мере фильтрования на зернах загрузки появляется пленка из коллоидов железа, которая в дальнейшем служит катализатором физико-химического процесса обезжелезивания воды. О присутствии пленки на зернах загрузки свидетельствует изменение цвета зёрен [2–6]. В качестве фильтрующих загрузок могут использоваться песок, щебень, керамзит, цеолит, пенополистирол с самым различным фракционным составом, начиная от мелкого (0,5мм) и заканчивая достаточно крупным (5 мм и более) [1; 3–4]. На Горбаковской станции обезжелезивания используется щебень; на Гошанской – пенополистирол; на Полоцкой – песок.

На всех трех станциях вода интенсивно аэрируется: на Горбаковской и Гошанской – путем свободного многократного излива; на Полоцкой – вода насыщается воздухом, проходя через водовоздушный насос (эжектор), и далее – за счёт излива в корпусе фильтра.

Фильтрование воды на Горбаковской и Полоцкой станциях предусматривается сверху вниз в направлении увеличения крупности зерен тяжелой загрузки, на Гошанской – снизу вверх и также в направлении увеличения крупности гранул пенополистирола. Все исследуемые фильтры имели по высоте пробоотборники для отбора проб воды и фиксирования ее качественных показателей по мере прохождения загрузки.

**Результаты исследований.** Концентрация железа в исходной воде Горбаковской станции в среднем составляет 1,83...2,08 мг/дм<sup>3</sup>. На станции предусмотрено две ступени аэрации подземной воды – во входной камере и над центральными каналами фильтров. Во входной камере предусмотрен обычный излив воды с высоты 0,5...0,6 м. При повышении расхода выше расчетного, обычно в ночное время, эта высота может понижаться. Для повышения аэрации в каждом фильтре установлен аэратор над центральным каналом. Аэратор представляет собой лоток шириной 250 мм и длиной 4 м. В середине лотка приварены перегородки с шагом 0,2 м на высоту немного меньше высоты лотка. Вода обогащается кислородом за счет турбулизации и последующего свободного излива потока. Однако эффективность его работы зависит от горизонтальности устройства этих перегородок, самого лотка и подаваемого расхода воды. Поэтому на отдельных фильтрах наблюдались неравномерные потоки по всей длине лотков. Исследование эффективности аэрирования воды проводилось для двух периодов – максимальной (тарифная зона «ночь») и минимальной (тарифная зона «пик») – подачи воды на станцию обезжелезивания. В периоды максимальных нагрузок аэратор во входной камере практически полностью был затоплен. Определение концентрации растворенного кислорода в воде проводилось методом Винклера. Для исключения возможности попадания воздуха в исследуемую воду во время отбора пробы воды отбирались в кислородные стаканы при помощи сифонной трубки. На рисунках 1, 2 представлен процесс аэрации воды на Горбаковской станции.



Рисунок 1 – Камера аэрации



Рисунок 2 – Аэрационный желоб и фильтр

На Горбаковской станции очистки воды обеспечивается 16-ю фильтрами, которые размещены на двух самостоятельных блоках. Фильтры загружены гранитным щебнем. Толщина слоя загрузки составляет приблизительно 1,9 м. Гранулометрический состав загрузки фильтра № 1 представлен на рисунках 3 и 4).

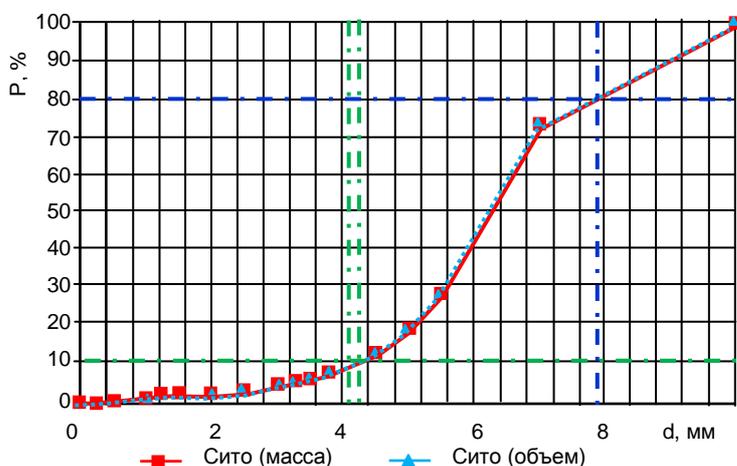


Рисунок 3 – Гранулометрический состав загрузки фильтра № 1



Рисунок 4 – Загрузка после классификации

Кислород в поступающей на станцию воде отсутствует. Изменение его концентрации на первом блоке после аэрации и прохождения загрузки представлено на рисунке 5.

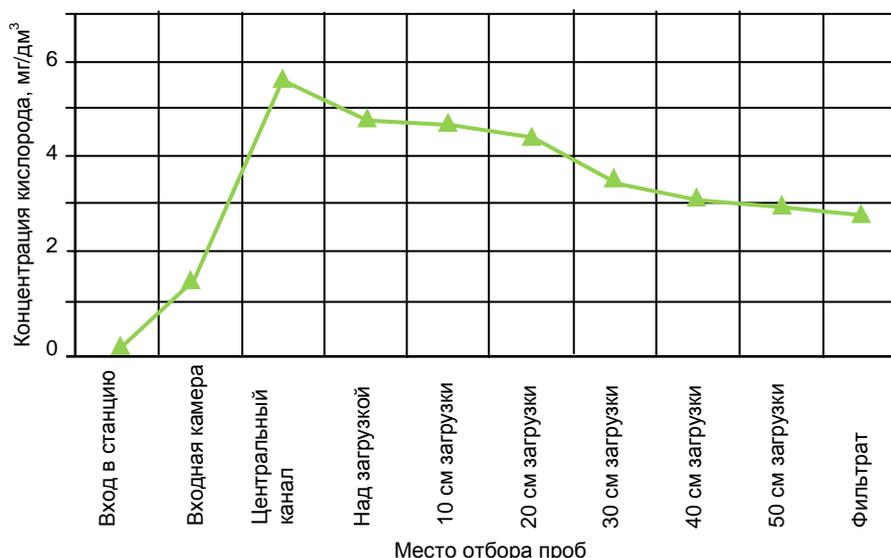


Рисунок 5 – Изменение концентрации кислорода при минимальной подаче воды на станцию

Параллельно с отбором проб на содержание кислорода отбирались пробы на содержание закисного и окисного железа (рис. 6). При общей концентрации железа  $2,06 \text{ мг/дм}^3$  в исходной воде двухвалентное железо составляло 95,1%, перед загрузкой – 73,7%, в первых слоях это соотношение уменьшалось до 44...49% и в дальнейшем практически не изменялось. Эффективность обезжелезивания составляла 95%, в фильтрате концентрация железа доходила до  $0,11 \text{ мг/дм}^3$ .

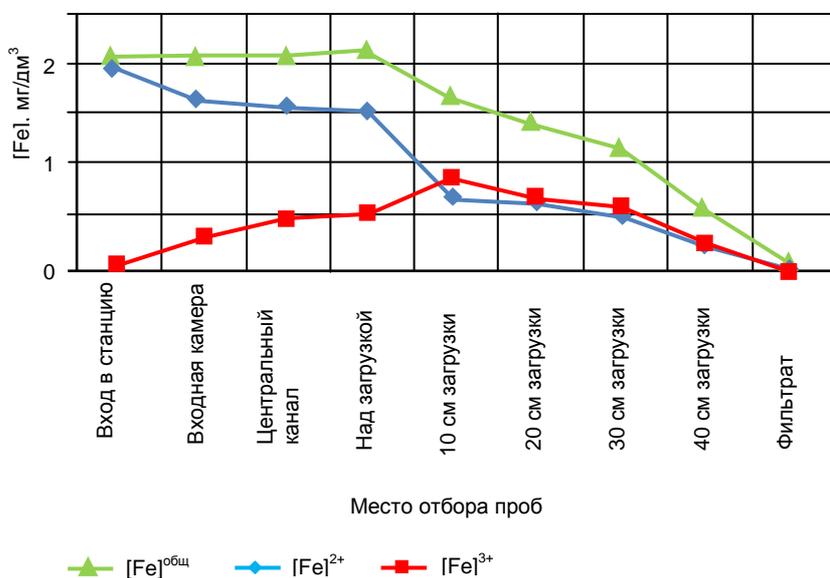


Рисунок 6 – Изменение концентрации железа при минимальной подаче воды

Результаты исследований концентрации кислорода при максимальной подаче воды на станцию представлены на рисунке 7.

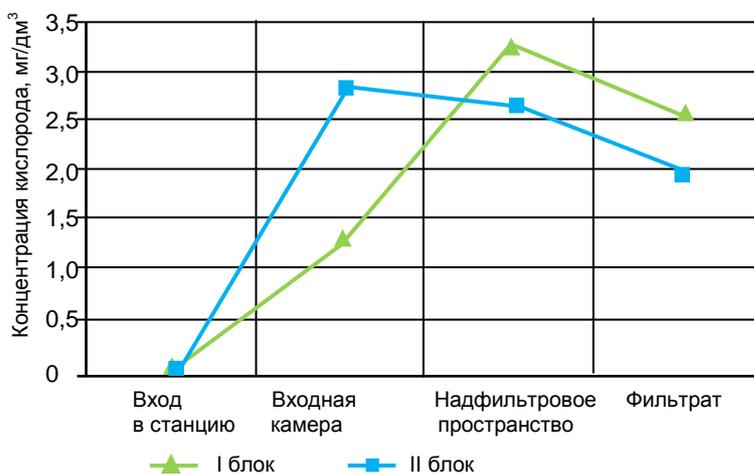


Рисунок 7 – Изменение концентрации кислорода при максимальной подаче воды на станцию

Концентрация кислорода во входных камерах блоков отличается, что связано с различными высотами аэрации воды – на втором блоке высота меньше и изменяется в зависимости от подаваемых расходов воды. Через практически полное затопление лотковых аэраторов на втором блоке станции концентрация кислорода в надфильтровом пространстве фильтров этого блока меньше. И как следствие, концентрация кислорода в фильтрате первого блока выше, о чем свидетельствуют данные таблицы.

Согласно стехиометрическим расчетам на окисление 1 мг закиси железа надо  $0,143 \text{ мг}$  «активного» кислорода. В то же время экспериментальные исследования показывают [1–5], что реально для химического окисления железа удельные расходы кислорода на 1 мг железа при его концентрации до  $5 \text{ мг/дм}^3$

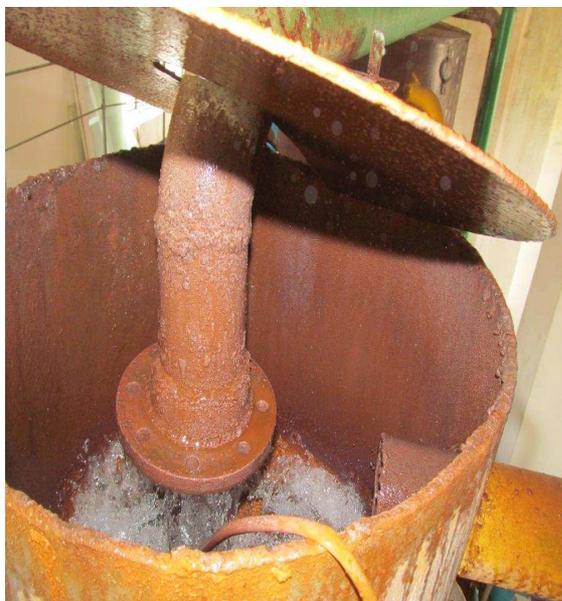
составляют не менее 0,8...1,0 [1; 4]. Одновременно нужно учесть расход кислорода на окисление сероводорода, составляющий 2,25...2,5 мг. В итоге, расчетное количество кислорода для окисления железа и сероводорода составит  $2,1 \cdot 1 + 0,5 \cdot 2,5 = 3,35$  мг/дм<sup>3</sup>.

Так как концентрация кислорода в воде меньше расчетной, то процесс обезжелезивания аэрацией может быть незавершенный, и в этот период работы станции фильтрат будет иметь повышенную концентрацию железа, что подтверждается наблюдениями за работой станции. Заметное поглощение кислорода происходит в первых слоях загрузки.

**Концентрация кислорода в воде при максимальной подаче воды на станцию**

Место отбора пробы	Время отбора	Концентрация кислорода, мг/дм <sup>3</sup>
Вход в входные камеры	01 часов 10 минут	0,098
Входная камера блока I	01 часов 10 минут	1,34
Надфильтровое пространство фильтра № 2 блока I	01 часов 10 минут	3,21
Фильтрат фильтра № 1 блока I	01 часов 10 минут	2,58
Входная камера блока II	03 часов 00 минут	2,83
Надфильтровое пространство фильтра № 14 блока II	03 часов 00 минут	2,69
Фильтрат фильтра № 14 блока II	03 часов 00 минут	1,97

На **Гошанской станции** контактного обезжелезивания воды исходная вода поступает в ступенчатый аэратор (рис. 8), где происходит насыщение воды воздухом и отдувается сероводород, далее вода проходит вниз по вертикальному воздухоотделителю. Их на станции два – один для трёх фильтров диаметром 1,4 м и одного диаметром 1,2 м; второй для карусельного фильтра диаметром 2,7 м из четырех секций. Из нижней части воздухоотделителей вода поступает в нижнюю часть пенополистирольных фильтров, проходит вверх через пенополистирольную загрузку и обезжелезенной собирается в надфильтровом пространстве (рис. 9).



**Рисунок 8 – Аэратор и воздухоотделитель**



**Рисунок 9 – Общий вид станции**

В качестве фильтрующей загрузки использован пенополистирол заводского изготовления с такими характеристиками:  $d_{10} = 2,05$  мм;  $d_{80} = 2,46$  мм;  $d_{ЭК} = 2,8$  мм;  $k_H = 2,4$ . Во втором фильтре были сделаны пробоотборники для забора фильтрованной воды через 10, 40, 70, 100 см от нижней кромки загрузки.

Результаты наблюдений за изменением форм и концентраций железа по пути следования воды через загрузку (рис. 10) весьма сходны с результатами, полученными на Горбаковской станции, – изменения концентрации кислорода по высоте загрузки идентичны.

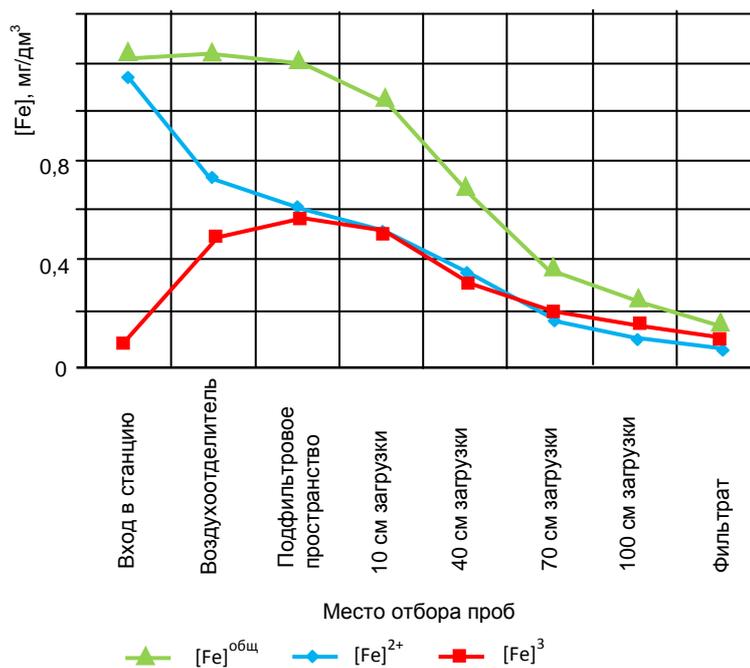


Рисунок 10 – Динамика изменения форм и концентраций железа при фильтровании через пенополистирольную загрузку

На Полоцкой фильтровальной станции для задержания окиси железа используются скорые фильтры с песчаной загрузкой диаметром 1...1,6 мм. Высота слоя загрузки поддерживается в пределах 1,7 м путем постоянного пополнения загрузки в фильтре. Фильтрование воды проводится с постоянной скоростью фильтрования в пределах 5...6 м/ч. Фильтры оборудованы пробоотборниками с отбором проб с глубины загрузки 10, 30, 130 см.

Исходная вода, проходя через эжектор (рис. 11), насыщается воздухом, и образующаяся водо-воздушная смесь поступает в камеру аэрации. Камера аэрации представляет собой прямоугольный резервуар и предназначена для распределения воды между фильтрами и принудительной отгонкой выделяющихся из воды газов (сероводород, метан, аммиак). Поступающая на фильтр вода изливается с высоты 0,5 м (рис. 12), что дополнительно её обогащает кислородом воздуха. На поверхности загрузки образуется адсорбционно-каталитическая пленка из ионов и оксидов двух- и трехвалентного железа, а также из продуктов жизнедеятельности железобактерий.



1 – трубопровод исходной воды;  
2 – эжектор; 3 – камера аэрации;  
4 – воздуховод для выделяющихся газов

Рисунок 11 – Камера аэрации



Рисунок 12 – Излив воды в корпусе фильтра

Динамика изменения форм и концентраций железа по ходу движения воды представлена на рисунке 13. Изменение концентрации общего железа по высоте песчаной загрузки происходит, по сути, по тем же законам, что и на рассматриваемых выше станциях.

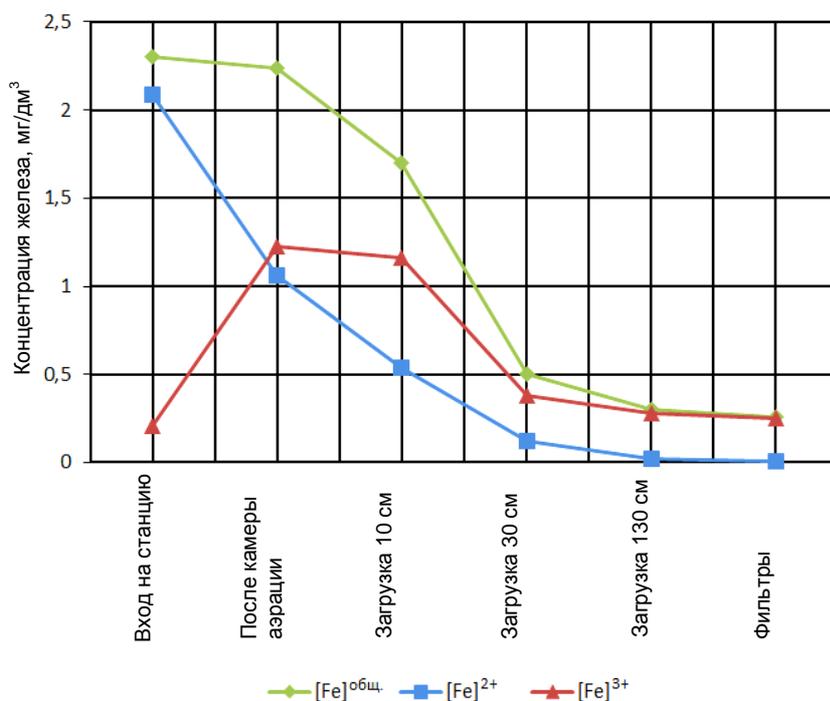


Рисунок 13 – Изменение форм и концентраций железа по высоте песчаной загрузки

Изменение концентрации растворённого кислорода в воде при её обработке проиллюстрировано на рисунке 14.

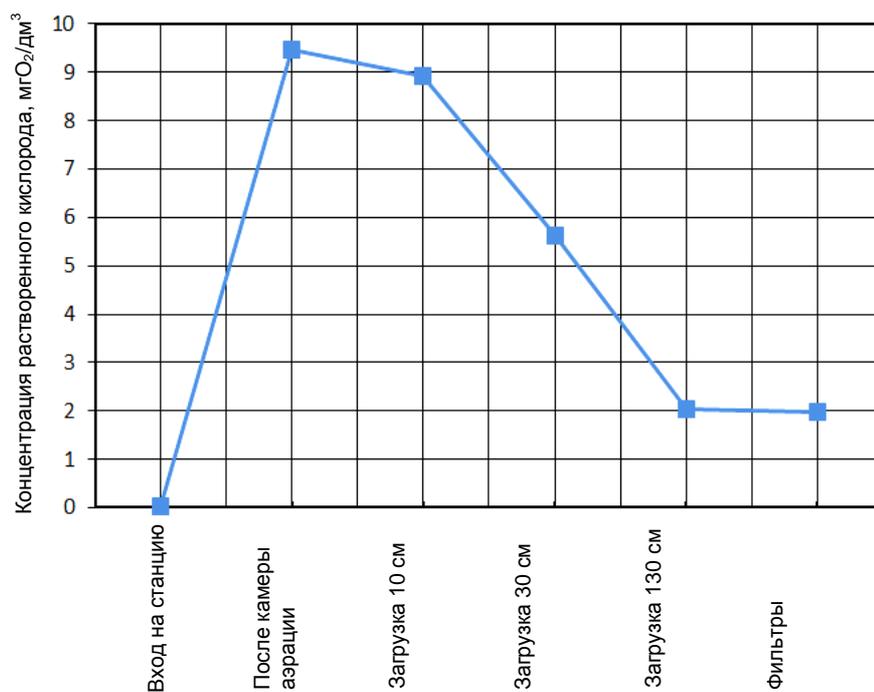


Рисунок 14 – Изменение концентрации кислорода в воде в процессе ее обработки

Концентрация кислорода после камеры аэрации, как видно из графика (см. рис. 14), достигает  $9,5 \text{ мг/дм}^3$  и далее постепенно снижается, расходуясь на окисление двухвалентного железа. Интенсивность подачи кислорода в указанных пределах практически не влияет на эффект обезжелезивания.

**Заключение.** Результаты исследований свидетельствуют о том, что при достаточной концентрации введённого кислорода процесс обезжелезивания проходит успешно в первых по ходу воды слоях любой загрузки. На практике используются различные способы введения кислорода, но предпочтительность отдается двухступенчатой аэрации благодаря её преимуществам перед другими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кульский, Л.А. Технология очистки природных вод / Л.А. Кульский, П.П. Строкач. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выш. шк., 1986. – 352 с.
2. Орлов, В.О. Водопостачання та водовідведення / В.О. Орлов, Я.А. Тугай, А.М. Орлова. – Киев: Знання, 2011. – 359 с.
3. Орлов, В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою / В.О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
4. Орлов, В.О. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням / В.О. Орлов. – Рівне: НУВГП, 2008. – 158 с.
5. Орлов, В.О. Аераційні методи знезалізнення води / В.О. Орлов, С.Ю. Мартынов // «Вода та водоочисні технології». – К.: НТУ «Київський політехнічний університет», 2011. – С. 42–52.
6. Очистка природных вод на пенополистирольных фильтрах / под ред. В.О. Орлова. – Рівне: НУВГП, 2012. – 172 с.
7. Epuration des eaux avec des filtres composés des billes de polystyrene Expans / V. Orlov [et al.]; Revue semestrielle internationale scientifique et technique // Ecole nationale superieur d'hydraulique. – 2013. – Algerie. – № 22. – С. 68–78.

*Поступила 27.10.2015*

#### STUDY AERATION SYSTEM WATER AT THE DEIRONING

**V. ORLOV, A. ORLOVA, D. KOMOROWSKI**

*The results of years of research on the process of iron removal stations operating in Ukraine and Belarus. The studies were conducted on the filter with sand, gravel and floating polystyrene. It is proved that the iron removal of underground water with a low concentration of iron is important to provide sufficient aeration of the water before entering it in the boot, in which the process of detention iron hydroxide passes identical in all of the types of downloads.*

УДК 628.34; 628.35

## ХАРАКТЕРИСТИКА И ВЫБОР РЕАГЕНТОВ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

*канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО*  
*(Полоцкий государственный университет;*  
*А.В. ГАЛУЗО*  
*(УП «Витебскводоканал»)*

*Рассматривается вопрос выбора реагентов и их растворов для удаления фосфора по технологической схеме обработки сточных вод. Приводятся сведения по реагентам для удаления фосфора из сточных вод. Дана их характеристика и определен выбор основных видов и типов реагентов для достижения требуемой остаточной концентрации фосфора при очистке смеси хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод города Витебска. Объектом исследования является станция аэрации УП «Витебскводоканал».*

Биогенные элементы, прежде всего азот и фосфор, представляют собой вещества, которые постоянно входят в состав различных организмов и играют большую роль в процессах их жизнедеятельности. Но поступление их повышенных концентраций в водоемы и водостоки нарушают в них естественные условия существования экосистем.

Например, первая группа общего фосфора может вызвать рост 1500...1700 г различных видов водорослей. При этом стимулируется размножение автотрофов и гетеротрофов, в результате чего потребление кислорода возрастает. Отмершие организмы опускаются на дно, постепенно разлагаются, ощущается дефицит кислорода на глубине и процесс эвтрофикации ускоряется, особенно в летнее время. Это вызывает бурный рост планктона, причем недостаток света вызывает гибель донной растительности, и производство кислорода в придонном слое прекращается. А в ночные часы растения и фитопланктон сами используют кислород для дыхания, а потому в предутренние часы его содержание понижается, приводя к гибели рыб («летний замор») [1].

В результате отрицательных воздействий азота и фосфора постепенно в водоеме начинают преобладать анаэробные процессы, которые сопровождаются образованием ядовитых веществ (фенолы, сероводород и метан). В итоге уничтожается большая часть аэробной флоры и фауны [2].

Основные источники поступления биогенных элементов в природные водоемы – продукты жизнедеятельности человека, объекты промышленного и сельского хозяйства, а также неочищенные или недостаточно очищенные сточные воды.

**Исследовательская часть.** Современное состояние канализационных очистных сооружений, целью которых является очистка сточных вод от минеральных, органических веществ и углеродсодержащих соединений, также связано с внедрением различных технологий глубокого удаления биогенных элементов. Для удаления азотных соединений в процессе очистки городских сточных вод в основном используется метод биологической нитрификации – денитрификации [3]. Сочетание этих процессов приводит к снижению общего азота, как правило, до требуемых нормативных значений. Для извлечения общего фосфора из сточных вод могут быть использованы физические, физико-химические, биологические методы, а также их комбинации [4].

По данным Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь концентрация общего фосфора в сточных водах населенных пунктов (смесь бытовых и производственных стоков), поступающих на очистку в станции аэрации, находится в пределах 5...20 мг/дм<sup>3</sup>. Под общим фосфором (далее – фосфор) понимают сумму в основном трех его составляющих: орто- и полифосфаты, а также органически связанный фосфор.

Задача данной работы – выбор реагентов и их растворов для удаления фосфора по технологической схеме обработки сточных вод города Витебска.

На станцию аэрации УП «Витебскводоканал» поступает смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, причем их количество и состав подвергаются постоянному изменению в соответствии с экономической ситуацией в республике. Анализ состава сточных вод показывает, что доля сточных вод хозяйственно-бытового назначения составляет порядка 65...70 %, следовательно, на долю промышленных стоков приходится 30...35 %. В настоящее время объем поступления смеси хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод равен 75...90 тыс. м<sup>3</sup>/сут. По данным 2013–2015 годов средние показатели сточных вод составляют: взвешенные вещества – 385 мг/дм<sup>3</sup>; химическое потребление кислорода (ХПК) – 780, биологическое потребление кислорода БПК<sub>5</sub> – 250 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>; азот по Кьельдалю – 60, фосфор общий – 6 мг/дм<sup>3</sup> [5].

Существующая в настоящее время технологическая схема очистки сточных вод состоит из следующих основных узлов:

- механическая очистка на решетках и песколовках, а также в первичных радиальных отстойниках;
- первый поток – биологическая очистка в 2-х коридорных аэротенках совместно с вторичным отстаиванием;
- второй поток – биологическая очистка в комплексных сооружениях биоблоках с различными зонами аэрации;
- обеззараживание и выпуск очищенных стоков в реку Западная Двина с требуемыми нормативными концентрациями по регламентируемым загрязнителям.

Используются выпуски каскадного и сосредоточенного глубинного типов, имеется возможность между ними перепуска сточных вод.

Сравнивая результаты эффективности снижения фосфора двух линий биологической очистки, отметим следующее:

- после первичных отстойников концентрация фосфора практически не снижается и даже может иметь место его увеличение на 3...5%;
- аэротенки и биоблоки в среднем удаляют фосфор общий от 50 до 69% в зависимости от режима работы сооружения. При этом можно предположить, что на стадии биохимической очистки сточных вод полифосфаты гидролизуются до ортофосфатов, в эту же форму также переходят растворимые фосфорсодержащие соединения [4; 7].

Остаточное содержание фосфора в очищенных сточных водах на выпусках в реку Западная Двина составляет 2...3 мг/дм<sup>3</sup> при временном разрешении на водопользование до 3,5 мг/дм<sup>3</sup>. Таким образом, работу очистных сооружений станции аэрации города Витебска по удалению фосфора из сточных вод в пределах временных норм можно считать удовлетворительной, однако этого недостаточно для достижения требований ТКП 17.06-08-2012, согласно которым норма должна составлять 2,0 мг/дм<sup>3</sup> [6]. Рекомендациями ХЕЛКОМ установлено, что эта величина должна быть ≤ 0,5 мг/дм<sup>3</sup> (ХЕЛКОМ – The Helsinki Commission, HELCOM – руководящий органом Конвекции от 1992 года по защите морской среды Балтийского моря, известной под названием «Хельсинская конвекция» [8]).

Для оценки использования многозонных схем биологической очистки сточных вод (сочетание аэробных и анаэробных зон) при удалении фосфора были проведены пробные исследования на контактной пилотной модели аэротенка и вторичного отстойника. Остаточная концентрация фосфора составила 1,3 мг/дм<sup>3</sup>. Это позволяет сделать вывод, что даже при переоборудовании конструкции аэротенков в многозонные сооружения или строительства новых, невозможно достичь в очищенных сточных водах концентрации фосфора 0,5 мг/дм<sup>3</sup> и ниже. Таким образом, в реальных условиях наиболее целесообразным можно считать, что для получения требуемых концентраций остаточного фосфора до требований ХЕЛКОМ необходимо дополнительно к биологической обработке сточных вод использовать реагентный метод.

С целью выбора видов и типов реагентов они были разделены на две группы: алюмосодержащие и железосодержащие реагенты (коагулянты).

Анализ продукции, предлагаемой в Республике Беларусь предприятиями и организациями, позволил определить реагенты, которые можно использовать для удаления фосфора из сточных вод. Реагенты имеют различный внешний вид, агрегатное состояние и процентное содержание массовой доли основного вещества, о чем свидетельствуют данные таблиц 1 и 2.

**Таблица 1 – Массовая доля основного вещества (%) в исследуемых алюмосодержащих реагентах**

№ п/п	Производитель (поставщик)	Реагенты, условные обозначения	Массовая доля основного вещества, %
1	СП «КСАНТ» ООО Республика Беларусь, г. Гомель	Алюминия сульфат, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ТУ ВУ400258949.003-2005. Гранулированный, второй сорт	16
2	СП «КСАНТ» ООО Республика Беларусь, г. Гомель	Алюминия сульфат, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ТУ ВУ400258949.003-2005. Водный раствор	7,7
3	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» Польша	Алюминия сульфат, Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Марка ALS. Водный раствор	7,9
4	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» Польша	Полиалюминий хлорид Al <sub>n</sub> (OH) <sub>m</sub> Cl Марка PAX18. Водный раствор	17

Таблица 2 – Массовая доля основного вещества (%) в исследуемых железосодержащих реагентах

№ п/п	Производитель (поставщик)	Реагенты, условные обозначения	Массовая доля основного вещества, %
1	ЗАО «ЭКОС-1» Российская Федерация, г. Москва	Железный купорос, Fe(SO <sub>4</sub> ) ТУ ВУ 14-156-35-2012. Гранулированный, второй сорт	52,8
2	ОАО «Речицкий метизный завод» Республика Беларусь, г. Речица	Железо сернокислое, Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ТУ ВУ 400024166.020-2013. Гранулированный, первый сорт	не менее 60
3	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» Польша	Железо сернокислое, Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Марка PIX113. Водный раствор	11,8
4	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» Польша	Железо хлорное, FeCl <sub>3</sub> Марка PIX111. Водный раствор	13,4

В 2014 году на территории очистных сооружений города Витебска построена станция реагентной доочистки сточных вод с технологическими линиями приготовления и дозирования реагентов в сухом и жидком виде.

Станция работает в автоматическом режиме. Для работы станции можно использовать как уже готовую продукцию в жидком виде, закачивая в ёмкость для хранения, расположенную рядом со зданием станция реагентной доочистки сточных вод, так и готовить из сухого товарного продукта. Оборудование позволяет в необходимом объёме дозировать раствор реагента как в постоянном режиме, так и в заданном – с изменением его расхода по времени.

Предварительным тестированием образцов алюмо- и железосодержащих коагулянтов, поступающих в сухом виде, установлено, что при приготовлении растворов реагентов необходимо учитывать следующие факторы:

- наличие дополнительных складских помещений для хранения реагента;
- наличие дополнительного состава персонала для постоянного приготовления рабочего раствора;
- в процессе приготовления раствора образуется осадок, следовательно, должен быть решен вопрос об утилизации осадка на станции реагентной очистки;
- низкие значения pH рабочего раствора алюмосодержащих коагулянтов приводят к быстрому износу оборудования;
- железосодержащие реагенты являются ядовитыми веществами, поэтому необходимо применение индивидуальных средств защиты кожи, слизистых и дыхательных путей, а также особые системы приточно-вытяжной вентиляции;
- рабочий раствор продукции (железосодержащие реагенты) из сухого вещества имеет неоднородный состав, что недопустимо для применяемого оборудования.

Использование товарного продукта в жидком виде значительно упрощает и делает более безопасной эксплуатацию реагентной станции, так как представляет собой готовый рабочий раствор, который можно хранить в ёмкости, расположенной вблизи здания станции реагентной доочистки сточных вод. Обслуживающему персоналу необходимо будет только задать программу для автоматического дозирования.

Для оценки эффективности использования реагентов и их выбора при удалении фосфора проведен комплекс исследований по их применению в точке ввода перед контактными резервуарами.

Алюмосодержащие реагенты PAX 18 и ALS, равно как и сульфат железа (III) PIX 113, обладают значительно меньшей удельной способностью к удалению фосфора. Остаточная концентрация фосфора при дозе реагентов 40...60 мл/м<sup>3</sup> (PAX 18 – 54,6 мг/дм<sup>3</sup>, ALS – 78,6 мг/дм<sup>3</sup>, PIX 113 – 62,8 мг/дм<sup>3</sup> по товарному продукту) составила более 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

По результатам лабораторных исследований определено:

- для осаждения 1 г фосфора требуется 1,9...2,2 г железа и 3...4 г алюминия. Более точную дозу назначают в зависимости от остаточного содержания фосфора в очищенной воде;
- по мере снижения концентрации фосфора расход железа на побочные реакции увеличивается в 2...4 раза вследствие конкуренции различных анионов.

Полученные результаты использования реагента PIX 111 (хлорид железа) в дозе 20 мл/м<sup>3</sup> (30 мг/дм<sup>3</sup>) по товарному продукту перед контактными резервуарами указывают на высокую степень удаления фосфора до остаточной концентрации, составляющей 0,5 мг/дм<sup>3</sup> и ниже.

Потребность в различных реагентах (готовой продукции) в сутки при условном расходе сточных вод 80 000 м<sup>3</sup> и достижении остаточной концентрации общего фосфора 0,5 мг/дм<sup>3</sup> представлена в таблице 3.

**Таблица 3 – Потребность реагентов (готовой продукции) в сутки при достижении разных остаточных концентраций общего фосфора**

№ п/п	Производитель (Поставщик)	Реагенты (условные обозначения)	Потребность реагента (готовой продукции) в сутки при расходе сточных вод 80 000 м <sup>3</sup> по снижению концентраций общего фосфора с начальных до остаточных значений, мг/дм <sup>3</sup>			
			с 4,0 до 3,5	с 3,5 со 2,0	с 3,5 до 1,5	с 3,5 до 0,5
1	ЗАО «ЭКОС-1» Российская Федерация, г. Москва	Железный купорос технический ТУ 14-156-35-2012	Применение данных реагентов, поставляемых в сухом виде, нецелесообразно из-за их сложной эксплуатация по технологическим условиям и положениям охраны труда			
2	ОАО «Речицкий метизный завод» Республика Беларусь, г. Речица	Железо (II) сернокислое ТУ ВУ 400024166.020-2013				
3	СП «КСАНТ» ООО Республика Беларусь, г. Гомель	Алюминия сульфат технический очищенный, сорт высший ГОСТ 12966-85				
4	СП «КСАНТ» ООО Республика Беларусь, г. Гомель	Алюминия сульфат раствор ТУ ВУ400258949.003-2005	1,3 м <sup>3</sup> 1,6 т	3,7 м <sup>3</sup> 4,8 т	4,98 м <sup>3</sup> 6,5 т	13,2 м <sup>3</sup> 17,1 т
5	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» производства КЕМПОЛ Республика Беларусь, г. Минск	Водный раствор сернокислого алюминия ALS	1,2 м <sup>3</sup> 1,6 т	3,6 м <sup>3</sup> 4,7 т	4,86 м <sup>3</sup> 6,4 т	12,8 м <sup>3</sup> 16,8 т
6	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» производства КЕМПОЛ Республика Беларусь, г. Минск	Полиалюминий хлорид РАХ18 Водный раствор	0,8 м <sup>3</sup> 1,1 т	2,46 м <sup>3</sup> 3,3 т	3,28 м <sup>3</sup> 4,5 т	8,69 м <sup>3</sup> 11,8 т
7	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» производства КЕМПОЛ Республика Беларусь, г. Минск	Водный раствор хлорного железа (III) РХ111/ FeCl <sub>3</sub>	0,41 м <sup>3</sup> 0,6 т	1,2 м <sup>3</sup> 1,7 т	1,6 м <sup>3</sup> 2,3 т	4,3 м <sup>3</sup> 5,9 т
8	ЧТУП «ВЕГЛО-СТАЛ» производства КЕМПОЛ Республика Беларусь, г. Минск	Водный раствор сернокислого железа(III) РХ113/ Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,5 м <sup>3</sup> 0,7 т	1,5 м <sup>3</sup> 2,3 т	2,0 м <sup>3</sup> 3,0 т	5,3 м <sup>3</sup> 8 т

*Примечания:*

1. Предусмотрена точка ввода перед контактными резервуарами.
2. Концентрация общего фосфора после вторичных отстойников составила в среднем 3,5 мг/дм<sup>3</sup>.
3. Результаты получены лабораторным путём и могут отличаться от потребности применения реагента в производственных условиях.

В таблице 3 рассчитан расход реагента на снижение от 3,5 (см. Спецводопользование\*) до необходимых концентраций в 1,5 и 0,5 мг/л фосфора. По существующей технологической схеме очистки сточных вод, показатели средних значений остаточной концентрации фосфора составляют примерно 2,5 мг/л, тогда расход реагента будет ниже. Окончательно расход реагента определится по результатам промышленных испытаний при устойчивой работе станции реагентной очистки.

\* В соответствии со статьей 24 Водного кодекса Республики Беларусь специальное водопользование субъектами хозяйствования осуществляется на основании разрешения, выданного территориальными органами Минприроды (областным комитетом природных ресурсов и охраны окружающей среды).

Таким образом, предварительные исследования показали, что наиболее эффективным способом химического удаления фосфора из сточных вод является ввод коагулянта РІХ 111 перед контактными резервуарами рабочей дозой 20 мл/м<sup>3</sup> (30 г/м<sup>3</sup> по готовому продукту). То есть для снятия 1 мг/дм<sup>3</sup> фосфора необходимо 10,36 мл/м<sup>3</sup> раствора реагента марки РІХ 111. Исходя из этого можно рассчитать требуемое количество этого реагента. Например, для удаления фосфора общего с 2,26 мг/дм<sup>3</sup> до 0,5 необходимо 18,2 мл/м<sup>3</sup> раствора реагента. Тогда при расходе сточных вод 80 000 м<sup>3</sup> реагента необходимо 1,4 м<sup>3</sup> в сутки, или 2,0 т (плотность 1,45 т/м<sup>3</sup>), следовательно, в среднем потребуется порядка 60 тонн в месяц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод в сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М.: Акварос, 2003.
2. Зейфман, Е.А. Интенсификация очистки сточных вод от биогенных элементов / Е.А. Зейфман, Е.А. Лебедева, Г.А. Тихановская. – Вологда: ВоГТУ, 2003.
3. Мишуков, Б.Г. Удаление азота и фосфора в очистных сооружениях канализации / Б.Г. Мишуков, Е.А. Соловьёва // Приложение к журналу «Вода и экология. Проблемы и решения». – СПб.: ЗАО «Водопроект-Гидрокоммунводоканал», 2004.
4. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Континент, 2011.
5. Ющенко, В.Д. Анализ работы сооружений для удаления соединений фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска / В.Д. Ющенко, А.В. Галузо, Т.С. Куприянич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 3. – С. 115–119.
6. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: ТКП 17.06-08-2012(02120). – Минск: РУП «ЦНИИКИВР», 2012.
7. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы / М. Хенце [и др.]; пер. с англ. – М.: Мир, 2009.
8. ООО «Экология и бизнес» [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – [http://www.helcom.ru/helsinki\\_convention](http://www.helcom.ru/helsinki_convention). – Дата доступа: 02.11.2015.

Поступила 08.12.2015

#### DESCRIPTION AND SELECTION OF REAGENTS FOR REMOVAL PHOSPHORUS COMPOUNDS FROM WASTEWATER

V. YUSHCHANKA, A. HALUZA

*The article provides information about reagents for remove of phosphorus from wastewater. The analysis of their characteristics is done and selection of basic kinds and types of reagents to achieve the required residual concentration of phosphorus in the treatment of a mixture of household and industrial wastewaters in the city of Vitebsk is made. The object of research is the waste water treatment plants in Vitebsk.*

УДК 628.112

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

*д-р техн. наук, доц. В.В. ИВАШЕЧКИН*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлены основные положения расчета необходимого давления, создаваемого в полости закольматированного каркасно-стержневого фильтра, исходя из обеспечения его регенерации. Кольматация схематизирована в виде кольцевой зоны. Получены выражения для определения величин предельных давлений для 3-х стадий работы фильтра. Приведена методика расчета количества энергии, необходимого для разрушения загрязнений, которые накапливаются в порах гравийной обсыпки и в фильтре водозаборной скважины. Составлено уравнение баланса энергии, идущей на деформацию проволоочной навивки и разрушение загрязнений. Приведен пример расчета необходимых энергозатрат. Рассмотрен численный пример расчета по определению рабочего интервала давлений и необходимых энергозатрат для обработки каркасно-стержневого фильтра с заданной прочностью закольматированной гравийной обсыпки. Установлено, что величина необходимого давления определяется в значительной степени прочностными параметрами водоприемной поверхности на растяжение.*

**Введение.** В процессе эксплуатации производительность водозаборных скважин снижается. Это обусловлено накоплением кольматирующих отложений в отверстиях фильтров и порах гравийной обсыпки [1]. Со временем отложения минерализуются и упрочняются. Применение известных импульсных методов пневмовзрыва, электроразряда и газового взрыва позволяет разрушить кольматирующие отложения за счет передачи энергии закольматированному фильтру и гравийной обсыпке в форме ударной волны и волн сжатия, возникающих при пульсациях газовой полости (каверны) в фильтре скважины.

В литературе основное внимание уделяется расчетам требуемой величины давления  $p$  на фронте распространяющейся волны, которое должно быть достаточным для разрушения отложений. Основной исходной величиной этих расчетов является прочность  $[\sigma_{сж}]$  сцементированных кольматирующими отложениями гравия в прифильтровой зоне скважины, которая на основании исследований может достигать 2 МПа [1], в расчетах обычно принимается равной 1...1,5 МПа [2; 3]. Необходимое давление  $p$  на фронте волны должно превышать  $[\sigma_{сж}]$  на кольцевом участке сцементированной гравийной обсыпки толщиной  $\delta$ , примыкающей к фильтру. Этот участок, где  $p > [\sigma_{сж}]$ , называют зоной эффективного воздействия. Зная объем подвергаемых разрушению кольматирующих отложений в этой зоне, находят энергию единичного импульса и необходимое количество импульсов для регенерации 1 м погонного фильтра.

Например, при подводном взрыве торпеды детонирующего шнура (ТДШ) для определения давления  $p_{ф.в}$  на внутренней стенке фильтра в работе [2] предлагается формула для сферического заряда:

$$p_{ф.в} = 533 \left( G^{1/3} / R_{ф.в} \right)^{1,13}, \text{ где } G - \text{масса взрывчатых веществ в кг; } R_{ф.в} - \text{внутренний радиус фильтра.}$$

Давление  $p$  в водонасыщенном грунте за стенкой фильтра на расстоянии  $R$  при взрыве ТДШ определяют по формуле  $p = p_{ф.в} \cdot \beta (R_{ф.н} / R)^\mu$ , где  $\mu$  – коэффициент, зависящий от содержания защемленного воздуха в водонасыщенном грунте;  $R_{ф.н}$  – наружный радиус фильтра;  $\beta$  – степень снижения давления волны материалом фильтра [2].

Задавая радиус  $R = R_{ф.н} + \delta$  распространения отложений заданной прочности  $[\sigma_{сж}]$  и приравнивая  $p = [\sigma_{сж}]$ , из выражений (1) и (2) находят необходимую массу  $G$  взрывчатого вещества. Следует отметить, что применение формулы (1) необоснованно для описания поля давлений от взрыва ТДШ внутри скважины, так как формула получена для заряда тротила сферической формы, в то время как ТДШ представляет собой цилиндрический заряд, обычно равный длине фильтра. Использование формулы для описания процесса распространения волны давления в грунте вызывает трудности, так как коэффициент  $\mu$  изменяется в очень широких пределах – от 1,06 до 2,5 – в зависимости от содержания защемленного воздуха в грунте, количество которого трудно прогнозировать. Таким образом, указанные зависимости дают большую погрешность.

При электрогидроударном методе для расчета амплитуды давления на внутренней поверхности фильтра  $p_{ф.в}$  в работе [2] предлагается эмпирическая формула в зависимости от параметров разрядного контура, длины кабеля и величины расстояния между электродами разрядника, а затухание давления  $p$  на фронте волны в водонасыщенном грунте рекомендуется определять по формуле (2), о недостатках которой говорилось выше. Пульсации давления и скорости в парогазовом пузыре на послеразрядной стадии описаны с помощью уравнения Рэлея только для случая безграничной жидкости [4–5], что не позволяет их использовать для расчетов в скважинах.

При пневмоимпульсном методе для расчета амплитуды давления на внутренней поверхности фильтра  $p_{ф.в}$  в работе [2] предлагается эмпирическая формула в функции соотношения диаметров пневмокамеры и обрабатываемого фильтра, начального давления сжатого воздуха в пневмокамере и степени снижения давления сжатого воздуха при выхлопе в воду из окон пневмокамеры. С целью определения изменения давления и скорости промывного потока при выхлопе сжатого воздуха в скважину К.Н. Андреевым [6] выполнены теоретические исследования пульсаций воздушной полости. Исследования проводились с использованием уравнения Рэлея для условий безграничной жидкости (скважины бесконечного диаметра). Здесь работа  $E_2$  расширяющейся воздушной полости против сил внешнего давления при увеличении объема полости от начального объема  $V_0$  до текущего значения  $V$  определялась по формуле  $E_2 = (V - V_0)p_c$ , где  $p_c$  – гидростатическое давление в скважине в месте выхлопа газовой полости. Принимаемое в работе [6] постоянным значение  $p_c$  не соответствует условиям пульсаций воздушной полости в реальной скважине конечных размеров, где на поверхность полости действует переменное во времени давление, зависящее от скорости ее расширения, сил инерции и сопротивления движению.

Для газоимпульсного метода регенерации фильтров взрывом пропан-бутановой газовой смеси в подвижной взрывной камере для описания изменения давления во времени внутри взрывной камеры радиусом  $r_0$  предложена полученная после обработки лабораторных экспериментов эмпирическая зависимость  $p(r_0, t) = p_{взр} \sum_{i=1}^n e^{-\beta t} \sin \lambda_i t$ , где  $\lambda$  и  $\beta$  – эмпирические коэффициенты;  $p_{взр}$  – начальное давление взрыва во взрывной камере [7].

Последнее выражение имеет узкую область применения, так как получено только для подвижной взрывной камеры и взрыва пропан-бутановой газовой смеси в лабораторных условиях. В нем не учтены: глубина скважины, в которой производится взрыв, соотношение диаметров взрывной камеры и фильтра, а также силы инерции при разгоне и торможении камеры. Выражение неприемлемо для газоимпульсного способа регенерации фильтров взрывами водородно-кислородной смеси, которые производятся в неподвижных взрывных камерах поинтервально [8].

Энергию в единичном импульсе  $E_{ед}$ , идущую на разрушение цементированного кольматанта в зоне эффективного воздействия, в работе [2] предлагается определять через удельную энергию дробления  $E_{др}$ , которую принимают в пределах 120...150 кДж/м<sup>3</sup>. Тогда необходимое количество импульсов  $n$  с энергией  $E_{др}$  на погонный метр фильтра определяется зависимостью  $n = E_{др} / E_{ед}$ . Объем закольматированной гравийной обсыпки, подвергаемой разрушению, определяют как объем кольцевого цилиндра толщиной  $\delta$  высотой 1 м, примыкающего к фильтру. Как указывалось ранее, в пределах кольцевой зоны толщиной  $\delta$  (зоны эффективного воздействия) должно выполняться соотношение  $p > [\sigma_{сж}]$  и ее размеры определяются по данным затухания волн давления в прифильтровой зоне скважины.

Следует отметить, что методика расчета энергии единичного импульса  $E_{ед}$  не лишена недостатков. Она основана на использовании значений удельной энергии дробления  $E_{др}$  нарушенных и трещиноватых пород механическим способом. Здесь надо иметь в виду, что механический способ дробления породы отличается физикой воздействия от импульсных способов разрушения кольматирующих отложений ударными волнами и волнами сжатия. Здесь первый импульс давления создает трещины в кольматирующем кольце, а последующие импульсы той же энергии уже не способны измельчить элементы кольца на более мелкие части из-за нарушенной сплошности кольца и утечек энергии через трещины. Кроме того, указанная методика базируется на учете энергии, переносимой только ударной волной, создающей в цементированных отложениях сжимающие напряжения, превышающие их предел прочности на сжатие.

**Основная часть.** В литературе отсутствует методика расчета квазистатического воздействия на фильтр и цементированную обсыпку от давления газовой полости, образующейся при сжигании газовой смеси. В этой связи целью данной работы явилась разработка методики расчета технологических параметров газоимпульсного способа при поинтервальной регенерации участков фильтра, ограниченных пакерами.

Технологически процесс газоимпульсной декольматации фильтра, закольматированного прочными отложениями, следует вести в замкнутых секциях малого объема, который соизмерим с объемом продуктов газового взрыва при их максимальном расширении. Здесь на стенки закольматированного фильтра будет действовать «квазистатическое давление», вызванное термодинамическим расширением продуктов взрыва вследствие их высокой температуры. Понятие «квазистатическое давление» используется в электрогидроимпульсной штамповке [9]. Вышесказанное позволяет схематизировать задачу о кольматации и регенерации скважин рассмотрением некоторой кольцевой зоны толщиной  $\delta$ , коаксиальной фильтру, в которую включается и закольматированная водоприемная поверхность. Поровый цемент соприкосновения имеет высокую степень сцепления с зернами обсыпки и с водоприемной поверхностью фильтра, например, проволочной, что обеспечивает их совместную работу при декольматации фильтра газовыми взрывами.

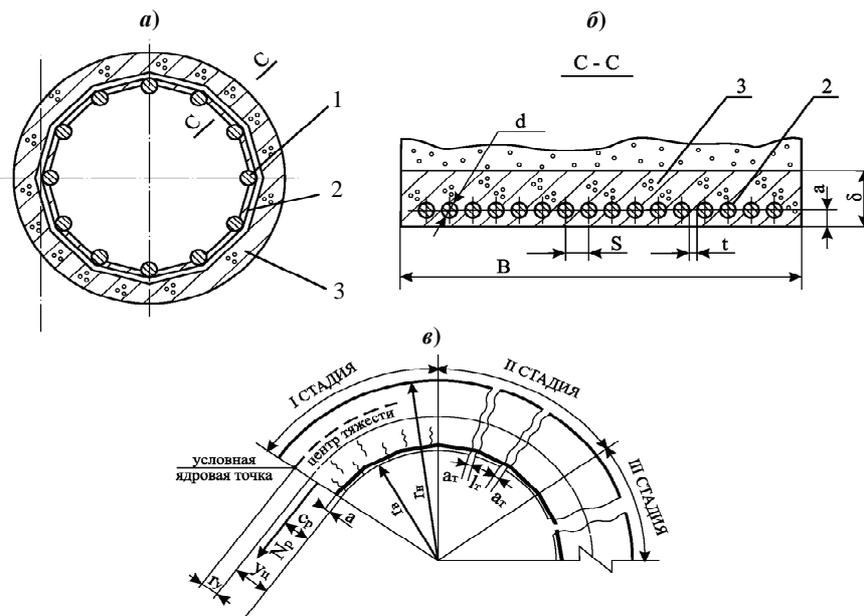
**Расчет необходимых рабочих давлений в замкнутых секциях малого объема.** Окружные растягивающие напряжения  $\sigma_0$ , действующие в стенках однородного толстостенного цилиндра толщиной  $\delta$  ( $\delta > 0,05d_{cp}$ ) под действием внутреннего давления  $p$ , определяются по формуле Ламе [10]. Напряжения  $\sigma_0$

изменяются по толщине стенки по гиперболическому закону. Равнодействующая сила  $N_p$  от них в стенке цилиндра при действии давления  $p$  на участке цилиндра длиной  $b$  равна [10]

$$N_p = pr_e b. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что сила  $N_p$  не зависит от толщины стенки  $\delta$ , а прямо пропорциональна давлению  $p$  и внутреннему радиусу цилиндра (фильтра)  $r_e$ . Сила приложена на расстоянии  $c_p$  от внутренней поверхности цилиндра (рис. 1).

$$c_p = r_e \left[ \frac{\ln(r_n / r_e)}{1 - (r_e / r_n)^2} - 0,5 \right] < \frac{\delta}{2}. \quad (2)$$



**а** – поперечный разрез; **б** – продольный разрез; **в** – расчетная схема;  
**1** – стержни каркаса фильтра; **2** – проволочная навивка; **3** – цементированная гравийная обсыпка  
**Рисунок 1** – Схема закольцованного каркасно-стержневого фильтра

Рассмотрим напряженное состояние закольцованного каркасно-стержневого фильтра от внутреннего давления  $p$  (см. рис. 1).

Фильтр имеет проволочную навивку из нержавеющей стали диаметром 2...3 мм на опорном каркасе из круглых стержней согласно ТУ 51-644-74 [1, табл. 23]. При создании в заполненной жидкостью полости закольцованного фильтра импульсов давления можно выделить три основные стадии его работы под нагрузкой (рис. 1, в).

**Стадия I.** При приложении внутреннего избыточного давления  $p$  появляются растягивающие напряжения в проволочной навивке и цементированной гравийной обсыпке. Эта стадия продолжается до тех пор, пока напряжения  $\sigma_0$  в цементированной гравийной обсыпке не достигнут сопротивления растяжению  $R_{c,2}$  ( $\sigma_0 = R_{c,2}$ ), а равнодействующая  $N_p$  не станет равной

$$N_{p1} = p_1 r_e b, \quad (3)$$

где  $p_1$  – первое предельное давление.

Расчет давления  $p_1$ , которое сможет выдержать цементированный кольматант перед образованием трещин, можно выполнить по способу ядровых моментов для внецентренно растянутого сечения, исходя из положения о том, что момент внешних сил  $M_1$  будет равен моменту внутренних усилий перед образованием трещин  $M$  [11].

При внецентренном растяжении силой  $N_{p1}$  первое предельное давление  $p_1$  равно

$$p_1 = \frac{R_{c,2} W_m}{br_e (e + r_y)} = \frac{R_{c,2} W_m}{br_e (y_u - c_p + r_y)}, \quad (4)$$

где  $y_u$  – положение центра тяжести приведенного сечения относительно внутренней образующей фильтра;

$e$  – эксцентриситет приложения силы  $N_{p1}$  относительно центра тяжести приведенного сечения площадью  $F_n$ ;  $W_T$  – упругопластический момент сопротивления;  $R_{c,z}$  – сопротивление растяжению.

Величину  $y_u$  находят по формуле

$$y_u = S_n / F_n = \frac{\frac{b\delta^2}{2} + nF_{np}a}{\left(F + F_{np} \frac{E_{np}}{E_{c,z}}\right)}, \quad (5)$$

где  $S_n$  – статический момент приведенного сечения относительно образующей внутренней стенки фильтра;  $F_n$  – площадь приведенного сечения;  $F$  – геометрическая площадь сечения ( $F = \delta b$ ) при  $b = 1$  м;  $F_{np}$  – площадь проволочной навивки,  $F_{np} = f_{np} / S$ ;  $S$  – шаг навивки проволоки диаметром  $d$  (расстояние в осях);  $S = d + t$  ( $t$  – просвет (зазор) между витками);  $E_{np}, E_{c,z}$  – модули упругости проволоки и цементированной кольматантом гравийной обсыпки;  $n = E_{np} / E_{c,z}$ ;  $f_{np}$  – площадь сечения одной проволоки;  $a$  – положение центра тяжести проволочной навивки относительно образующей внутренней стенки фильтра.

Расстояние  $r_y$  (расстояние от центра тяжести приведенного сечения до условной ядровой точки) находят по формуле

$$r_y = \frac{W_m}{F_n} = \frac{1,75W_n}{F_n}, \quad (6)$$

где  $W_n$  – момент сопротивления приведенного сечения относительно образующей внутренней стенки,  $W_n = I_n / y_u$ ;  $I_n$  – момент инерции приведенного сечения,  $I_n = \frac{b\delta^3}{12} + b\delta \left(y_u - \frac{\delta}{2}\right)^2 + nF_{np} (y_u - a)^2$ .

При центральном растяжении силой  $N_{p1}$  имеет место равенство [12]:

$$N_{p1} = R_{c,z} (b\delta + 2nF_{np}). \quad (7)$$

Приравняв (3) и (7), получим выражение для определения давления  $p_1$ :

$$p_1 = \frac{R_{c,z} (b\delta + 2nF_{np})}{br_b}. \quad (8)$$

При отсутствии опытных данных о значениях  $R_{c,z}$  его можно определить по приближенной формуле [11] через кубиковую прочность  $[\sigma_{сж}]$  цементированного гравия:  $R_{c,z} = 0,233[\sigma_{сж}]^{2/3}$ .

**Стадия II.** С ростом избыточного давления  $p$  напряжения в цементированной гравийной обсыпке увеличиваются настолько, что в ней образуются трещины. С этого момента обсыпка полностью выключается из работы, а растягивающие напряжения  $\sigma_0$  воспринимаются только проволочной навивкой. В качестве критерия для определения эффективности импульсной обработки фильтра может быть взята ширина раскрытия трещин  $a_T$  в цементированном кольце, при которой кольцо станет водопроницаемым, то есть трещины должны быть сквозными. Согласно [12], предельно допустимая ширина продолжительного раскрытия трещин для железобетонных элементов, воспринимающих давление жидкостей, обеспечивающая ограничение водопроницаемости конструкции, равна  $a_T = 0,2$  мм.

Необходимое давление  $p_{II}$ , которое обеспечит заданную ширину  $a_{TII}$  раскрытия трещин, нормальной продольной оси закольматированного фильтра, определено на основе общих положений расчета по определению ширины раскрытия трещин [10]. Учитывая, что в конце второй стадии напряженного состояния проволочной навивки со цементированным слоем гравийной обсыпки, когда ширина раскрытия трещины достигает  $a_{TII}$ , необходимое давление равно  $p_{II}$  и  $N_{pII} = p_{II} r_b$ , тогда получим

$$p_{II} = \frac{a_{TII} E_{np} F_{np} + 0,7 R_{c,z} \cdot F \frac{u}{\mu} \eta}{\frac{u}{\mu} \eta \cdot b \cdot r_b}, \quad (9)$$

где  $\eta = \frac{R_{c,z}}{\omega \cdot Y_c}$ ,  $u = \frac{F_{np}}{x}$ ,  $\mu = \frac{F_{np}}{F}$ ;  $x$  – периметр сечения проволоки;  $Y_c$  – максимальное напряжение сцепления проволоки со цементированной гравийной обсыпкой;  $\omega$  – коэффициент полноты эпюры сцепления; для круглой проволочной навивки  $u = d/4$ ,  $\eta = 1,25$  [11].

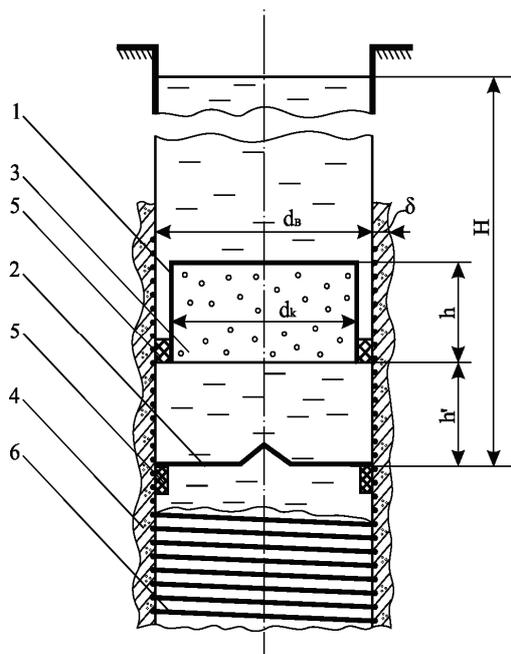
**Стадия III.** Характеризуется тем, что при дальнейшем увеличении давления  $p$  напряжения в проволочной навивке достигают временного сопротивления на растяжение  $R_{np}$  и при  $p = p_{III}$  происходит разрушение фильтра.

Окончательно давление  $p_{III}$  составит

$$p_{III} = \frac{R_{np} \cdot F_{np}}{r_e \cdot b}. \quad (10)$$

#### Расчет энергозатрат для разрушения отложений

Расчетная схема обработки фильтра показана на рисунке 2. В качестве расчетного значения давления  $p_{расч}$  принято давление в диапазоне  $p_{II} < p_{расч} < p_{III}$ .



- 1 – корпус взрывной камеры;  
2 – отражатель; 3 – камера сгорания;  
4 – закольцованный фильтр; 5 – пакеры;  
6 – проволочная навивка

Рисунок 2 – Расчетная схема обработки каркасно-стержневого фильтра с проволочной навивкой в замкнутой секции малого объема, ограниченной пакерами

Применение пакеров позволяет изолировать обрабатываемый интервал высотой  $h'$  закольцованного каркасно-стержневого фильтра от ствола скважины. Фильтр рассмотрим в виде цилиндра с толщиной стенки  $\delta$ , состоящего из проволочной навивки, находящейся внутри цементированной гравийной обсыпки, и представляющего единую комплексную систему, которая под действием внутреннего импульсного давления за счет сил сцепления между составляющими совместно работает на растяжение.

При расчете необходимой энергии будем использовать следующие допущения: фильтр полностью закольцован и непроницаем для жидкости; рабочая камера и отражатель выполнены абсолютно жесткими; жидкость сжимаемая; проволочная навивка и цементированная гравийная обсыпка работают на растяжение по закону Гука; давление в камере сгорания в продуктах взрыва  $p_{взр} = 10p_0$ , где  $p_0$  – гидростатическое давление в скважине в месте взрыва [8].

После взрыва газовой смеси задачу распространения волны давления в полости закольцованного фильтра можно рассматривать как распространение гидравлического удара в тупиковом трубопроводе, когда к участку фильтра высотой  $h'$  внезапно подключили источник высокого давления (взрывную камеру). Давление на границе «продукты взрыва – жидкость» резко возрастает на величину  $\Delta p_{y\delta} = p_{взр} - p_0$ .

Волна давления со скоростью  $c$  перемещается к отражателю, имея давление на фронте, равное  $\Delta p_{y\delta}$ . Скорость жидкости в плоскости фронта возрастает от 0 до  $v_0$ , её можно найти по формуле:  $v_0 = \Delta p_{y\delta} / \rho c$ . При подходе фронта волны давления к отражателю вся жидкость на участке длиной  $h'$  приобретает скорость  $v_0$ , однако её дальнейшее движение невозможно из-за наличия пакеров, и скорость столба жидкости на отражателе в момент прихода волны уменьшится до 0. При достижении прямой волной отражателя давление в полости фильтра на участке обработки длиной  $h'$  будет равно  $p_1 = p_0 + \Delta p_{y\delta}$ , при этом жидкость будет сжиматься, а стенки закольцованного фильтра расширяться.

Будем считать, что энергия продуктов взрыва  $W_{н.в}$  затрачивается на энергию гидропотока  $W_{з.п}$ , на работу по сжатию жидкости  $W_{с.ж}$  и работу по декольматации стенок фильтра  $W_{д.с}$ :

$$W_{н.в} = W_{з.п} + W_{с.ж} + W_{д.с}. \quad (11)$$

Энергия гидропотока  $W_{з.п}$  может быть найдена как приращение кинетической энергии жидкости, находящейся между камерой и отражателем при изменении скорости от 0 до  $v_0$ :

$$W_{з.п} = mv_0^2 / 2 = \rho V_{0ж} v_0^2 / 2 = \rho \pi r_e^2 h' v_0^2 / 2 = \pi r_e^2 h' \frac{\Delta p_{y\delta}^2}{2\rho c^2}, \quad (12)$$

где  $m$  – масса жидкости в полости фильтра объемом  $V_{0ж}$ .

Для расчета скорости движения волны  $c$  можно воспользоваться расчетными формулами с учетом закрепления фильтра водовмещающими породами [13].

Энергия, идущая на сжатие жидкости  $W_{с.жс}$ , по теореме Клапейрона может быть найдена как работа сил давления на пути деформации  $\Delta h'$  или как половина произведения силы давления на  $\Delta h'$

$$W_{с.жс} = 0,5\Delta p_{y\delta} \pi r_g^2 \Delta h' = 0,5\Delta p_{y\delta} \Delta V_{жс}, \quad (13)$$

где  $\Delta V_{жс}$  – уменьшение объема жидкости в результате сжатия.

Для определения  $\Delta V_{жс}$  используем известное из теории упругости положение о том, что напряжение (давление  $\Delta p_{y\delta}$ ) равно произведению модуля упругости жидкости  $E_{жс}$  на относительное изменение объема  $\Delta V_{жс} / V_{0жс}$ :

$$\Delta p_{y\delta} = E_{жс} \frac{\Delta V_{жс}}{V_{0жс}}. \quad (14)$$

Откуда, выразив  $\Delta V_{жс}$  и подставив в (13), получим

$$W_{с.жс} = 0,5\Delta p_{y\delta}^2 \pi r_g^2 h' / E_{жс}. \quad (15)$$

Энергия, идущая на деформацию стенок фильтра  $W_{\delta,c}$ , состоит из энергии, идущей на растяжение навивки  $W_{p,np}$  и разрушение колымантанта (создание трещин в цементированной обсыпке)  $W_{p,k}$ :

$$W_{\delta,c} = W_{p,np} + W_{p,k}. \quad (16)$$

Энергия  $W_{p,np}$  может быть найдена как работа деформации проволочной навивки фильтра на величину  $\Delta r_{np} = r'_{np} - r_{np}$ , где  $\Delta r_{np}$  – приращение радиуса проволочной навивки в результате деформации  $r'_{np}$ ,  $r_{np} \approx r_g$  – значения радиусов соответственно в конце и до деформации. Выразим работу как половину произведения силы давления на удлинение  $\Delta r_{np}$ :

$$W_{p,np} = 0,5\Delta p_{y\delta} \cdot 2\pi r_g h' \Delta r_{np}. \quad (17)$$

Для определения  $\Delta r_{np}$  используем выражение  $\sigma_{np} = N_p / F_{np}$  для расчета растягивающих напряжений  $\sigma_{np}$  в проволочной навивке площадью  $F_{np}$  от действия ударного давления  $\Delta p_{y\delta}$  и закон Гука (см. допущения):

$$\sigma_{np} = N_p / F_{np} = \Delta p_{y\delta} r_g h' / F_{np}, \quad (18)$$

где  $N_p$  – равнодействующая сила от растягивающих напряжений  $\sigma_{np}$  в навивке при действии давления  $\Delta p_{y\delta}$ ;  $F_{np}$  – площадь сечения проволочной навивки на участке фильтра  $h'$ ,  $F_{np} = f_{np} h' / S$ .

Проволочная навивка при наличии сцепления с окружающей цементированной гравийной обсыпкой имеет более высокий модуль упругости  $E'_{np}$ , чем нормативный  $E_{np}$ , который корректируется коэффициентом  $\psi_{np}$ , зависящим от прочности сцепления  $E'_{np} = E_{np} / \psi_{np}$  [11].

Деформация проволочной навивки равна

$$\varepsilon_{np} = \frac{\sigma_{np}}{E'_{np}}, \quad (19)$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{2\pi r'_{np} - 2\pi r_{np}}{2\pi r_{np}} \approx \frac{\Delta r_{np}}{r_g}. \quad (20)$$

Объединив (19) и (20), с учетом (18) получим

$$\Delta r_{np} = \frac{\Delta p_{y\delta} r_g^2 S}{f_{np} E'_{np}}. \quad (21)$$

Подставив (21) в (17), получим

$$W_{p,np} = \frac{\Delta p_{y\delta}^2 \pi r_g^3 S \psi_{np}}{f_{np} E_{np}} h'. \quad (22)$$

Энергию создания трещин в цементированной гравийной обсыпке  $W_{p,k}$  найдем как работу деформации цилиндрической оболочки, состоящей из цементированного гравия, толщиной  $\delta$  и высотой  $h'$  на величину приращения радиуса  $\Delta r_{c,z}$ . Аналогично (17), получим

$$W_{p,k} = 0,5 p_1 \cdot 2\pi r_g h' \Delta r_{c,z}. \quad (23)$$

Равнодействующая сила  $N_{p1}$  от растягивающих напряжений в цементированной обсыпке при достижении давления  $p_1$  равна

$$N_{p1} = p_1 \cdot r_g \cdot h'. \quad (24)$$

С другой стороны, так как напряжения в цементированной гравийной обсыпке перед образованием трещин равны  $R_{c,z}$ , а в проволоочной навивке напряжения достигают  $\sigma_{np} = 2(E_{n,p}/E_{c,z})R_{c,z}$ , то согласно [12] для центрально-растянутых элементов  $N_{p1}$  определяется по формуле (7), где  $b = h'$ .

Деформация слоя цементированного гравия равна

$$\epsilon_{c,z} = \frac{R_{c,z}}{E_{c,z}} = \frac{\Delta r_{c,z}}{r_g}. \quad (25)$$

Откуда выразим приращение радиуса  $\Delta r_{c,z}$

$$\Delta r_{c,z} = \frac{R_{c,z}}{E_{c,z}} r_g. \quad (26)$$

Объединяя (24) и (7), выразим  $p_1$  и подставим вместе с  $\Delta r_{c,z}$  в выражение (23), получим

$$W_{p,k} = \frac{R_{c,z}^2 \delta + 2 \frac{E'_{np}}{E_{c,z}} \frac{f_{np}}{S} \pi r_g h'}{E_{c,z}}. \quad (27)$$

Расчеты  $W_{p,k}$  при максимальных значениях  $R_{c,z}$  показывают, что величина  $W_{p,k}$  на порядок меньше  $W_{p,np}$  и ей можно в расчетах пренебречь.

Реализованную энергию продуктами взрыва  $W_{n,g}$  можно найти как сумму работ, произведенных волной сжатия  $E_{e,c}$  и газовым пузырем  $E_n$ , то есть  $W_{n,g} = E_{e,c} + E_n$ . Величину  $E_{e,c}$  найдем через акустический КПД  $\eta_a$ , который представляет собой долю запасенной потенциальной энергии  $E_0$  продуктов взрыва с начальным объемом  $V_{0n}$ , уносимую волной сжатия

$$E_{e,c} = \eta_a E_0 = \eta_a \frac{P_{exp} V_{0n}}{k-1}. \quad (28)$$

Определенное опытным путем значение  $\eta_a$  для подводного взрыва смеси  $2H_2 + O_2$  составило 0,2% [8]. Величину  $E_n$  найдем из следующих соображений. За время  $t$  двойного пробега волны давления от границы раздела «пузырь – жидкость» до отражателя и обратно  $t = 2h'/c$ ; пузырь успеет расшириться с объема  $V_{0n}$  до  $V_{1n}$ . Это время получило название времени формирования силового поля в замкнутых камерах [14].

Таким образом, оставшаяся в парогазовой полости энергия  $E_1$ , способная произвести полезную работу, будет равна

$$E_1 = \eta_e E_0 \left( \frac{V_{0n}}{V_{1n}} \right)^{k-1} = \eta_e E_0 \kappa_3, \quad (29)$$

где  $\eta_e$  – гидравлический коэффициент полезного действия (отношение потенциальной энергии пузыря, равной работе против сил внешнего давления  $p_0$ , к начальной энергии пузыря  $E_0$ ),  $\eta_e = 5...8\%$  [8];  $\kappa_3$  – коэффициент использования энергии (для пузыря, образующегося при электроразряде,  $\kappa_3 = 0,15...0,3$ ) [14].

Оставшаяся в парогазовой полости энергия после достижения максимальной деформации стенок фильтра будет равна

$$E_2 = \eta_e \kappa_3 E_0 \left( \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \right)^{k-1}, \quad (30)$$

где  $V_{2n}$  – объем парогазового пузыря в момент достижения максимальной радиальной деформации проволоочной навивки фильтра.

Тогда работа, произведенная газовым пузырем  $E_n$ , составит

$$E_n = E_1 - E_2 = \eta_e E_0 \kappa_3 \left[ 1 - \left( \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \right)^{k-1} \right]. \quad (31)$$

После подстановки всех слагаемых в уравнение (11) получим

$$\pi r_e^2 h' \Delta p_{y0}^2 \left[ \frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{жс}} + \frac{r_e S \Psi_{np}}{f_{np} E_{np}} \right] = \frac{p_{всп} V_{0n}}{k-1} \left\{ \eta_a + \eta_e \kappa_3 \left[ 1 - \left( \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \right)^{k-1} \right] \right\}. \quad (32)$$

Если пренебречь неиспользованной энергией парогазового пузыря объема энергоносителя,  $V_{0n}$  может быть найден в первом приближении

$$V_{0n} = \frac{\pi r_e^2 h' \Delta p_{y0}^2 \left[ \frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{жс}} + \frac{r_e S \Psi_{np}}{f_{np} E_{np}} \right] (k-1)}{p_{всп} (\eta_a + \eta_e \kappa_3)}. \quad (33)$$

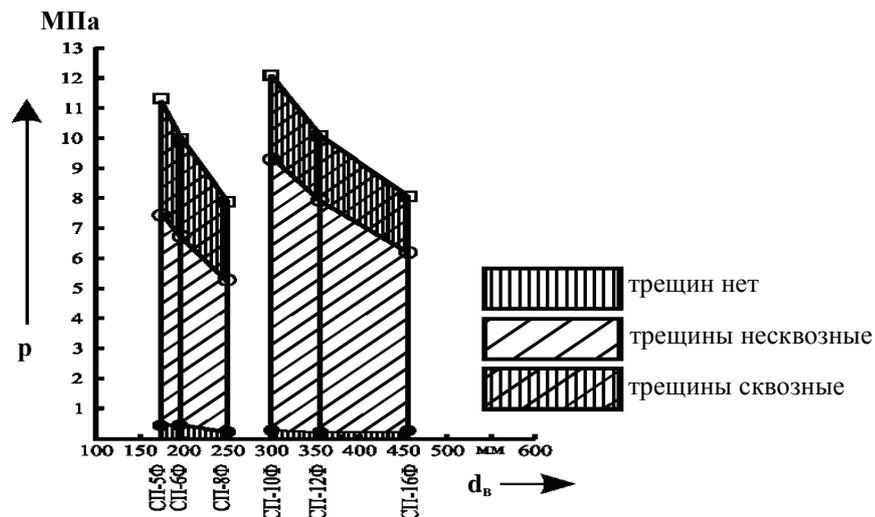
### Пример расчета технологических режимов декольматации

1. Определить значения предельных давлений  $p_I$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{III}$  для закольматированных каркасно-стержневых фильтров:  $\delta = 0,06$  м,  $[\sigma_{с.жс}] = 1,5$  МПа,  $R_{с.э} = 0,37$  МПа. Навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72),  $t = 2,5$  мм,  $R_{np} = 1400$  МПа,  $E_{np} = 240000$  МПа [100],  $a_T = 0,2$  мм,  $E_{с.э} = 20000$  МПа.

2. Определить величины запасаемой энергии в единичном импульсе при горении  $2H_2 + O_2$  и общее количество энергии, необходимой для декольматации 1 метра погонного указанных фильтров при  $H = 70$  м,  $\eta_a = 0,002$ ,  $\eta_e = 0,05$ ,  $\kappa_3 = 0,15$ .

#### Порядок расчета

1. Характеристики фильтров диаметром 5...16 дюймов возьмем из [1, табл. 23].
2. Давление  $p_I$  при внецентренном растяжении определим по (4) в МПа:  $p_{I(5)} = 0,29$ ;  $p_{I(6)} = 0,26$ ;  $p_{I(8)} = 0,22$ ;  $p_{I(10)} = 0,22$ ;  $p_{I(12)} = 0,19$ ;  $p_{I(16)} = 0,15$ .
3. Давление  $p_I$  при центральном растяжении определим по (8) в МПа:  $p_{I(5)} = 0,32$ ;  $p_{I(6)} = 0,30$ ;  $p_{I(8)} = 0,22$ ;  $p_{I(10)} = 0,22$ ;  $p_{I(12)} = 0,17$ ;  $p_{I(16)} = 0,15$ .
4. Давления  $p_{II}$  и  $p_{III}$  определим по формулам (9) и (10). Характер изменения предельных давлений показан на рисунке 3.



- – расчетные значения первого предельного давления; ○ – расчетные значения второго предельного давления;
- – расчетные значения третьего предельного давления

Рисунок 3 – Характер изменения предельных давлений при трех стадиях работы фильтров с внутренними диаметрами  $d_e$

5. Произведем расчеты  $V_{0n}$  по формуле (33) и вычислим запасаемую в камере энергию  $E$  с учетом энергоемкости смеси  $2H_2 + O_2$ .

Характер изменения удельных энергозатрат  $E_{y0}$  на 1 метр погонный фильтра и объема газовой смеси  $V_{0n}$  (при н. у.) в камере для разных диаметров фильтров  $d_e$  представлен на рисунке 4.

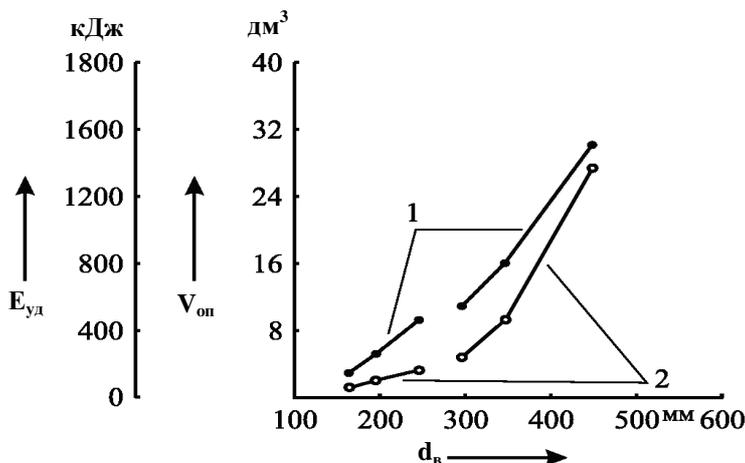


Рисунок 4 – Зависимость величины энергозатрат  $E_{y0}$  на 1 метр погонный фильтра (1) и объема  $V_{0n}$  (при н. у.) смеси  $2H_2 + O_2$  в камере (2) от диаметра фильтра  $d_e$

**Заключение.** Рассмотрены технологические основы поинтервальной газоимпульсной обработки фильтра в замкнутых секциях малого объема. В результате анализа напряженного состояния закольматированного каркасно-стержневого фильтра со сцементированным кольцом гравийной обсыпки от действия сил давления внутри фильтра предложено рассматривать три стадии его работы: I – появление несквозных трещин; II – образование сквозных трещин с шириной раскрытия, достаточной для обеспечения водопроницаемости; III – разрушение водоприемной поверхности фильтра. На I стадии трещины появляются при достижении первого предельного давления  $p_1$ . В конце II стадии при достижении второго предельного давления  $p_{II}$  ширина раскрытия трещин  $a_T$  становится равной 0,2 мм, их условно считают сквозными. На стадии III ширина раскрытия трещин возрастает до момента достижения предельного давления  $p_{III}$ . Это момент, когда исчерпывается сопротивление проволочной навивки растяжению. Для начала каждой стадии получены выражения для расчета величин предельных давлений  $p_1$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{III}$ .

Рассмотренные стадии напряженного состояния проволочного фильтра со сцементированным кольцом гравийной обсыпки позволяют рекомендовать диапазон давления  $p_{II} < p < p_{III}$  на внутренней поверхности фильтра при его декольматации. При этом обеспечивается сохранность водоприемной поверхности и разрушение кольца с шириной раскрытия трещин не менее  $a_{TII}$ .

Получено уравнение баланса энергии, идущей на деформацию проволочной навивки каркасно-стержневого фильтра и создание в кольматирующем кольце сквозных трещин. Определены необходимые энергозатраты при поинтервальной газоимпульсной обработке фильтра.

Разработана методика расчета технологических режимов газоимпульсной обработки каркасно-стержневых фильтров скважин в замкнутых секциях малого объема.

Рассмотрен пример применения методики при расчете величин предельных давлений  $p_1$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{III}$ .

Полученные сравнительно небольшие значения давления  $p_1$  указывают на то, что сцементированная гравийная обсыпка плохо сопротивляется растягивающим напряжениям и основную роль при расчете давления  $p_{II}$  имеют характеристики водоприемной поверхности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин / В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
2. Щеголев, Е.Ю. Регенерация водозаборных скважин импульсными методами: дис. ... канд. техн. наук / Е.Ю. Щеголев. – М., 1987. – 140 л.
3. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду: справ. изд. / Д.Н. Башкатов [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
4. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

5. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях / М.И. Балашканд, С.А. Ловля. – М.: Недра, 1977. – 150 с.
6. Андреев, К.Н. Пневмореагентная регенерация скважин на воду: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / К.Н. Андреев. – М., 1990. – 23 с.
7. Школьный, Н.П. Разработка виброимпульсного способа регенерации скважин на воду: дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Школьный. – Ивано-Франковск, 1984. – 155 с.
8. Ивашечкин, В.В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения / В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 276 с.
9. Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер / В.Н. Чачин [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1985. – 199 с.
10. Кочетов, В.Т. Сопротивление материалов / В.Т. Кочетов, А.Д. Павленко, М.В. Кочетов. – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 366 с.
11. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: общ. курс: учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
12. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84. – М.: Стройиздат, 1985.
13. Гидравлический расчет и устройство водопроводов из железобетонных труб / В.С. Дикаревский [и др.]. – К.: Будівельник, 1984. – 122 с.
14. Об оптимизации формы разрядной камеры при электрогидроимпульсной штамповке / А.Г. Рябинин [и др.] // Высокоскоростная обработка материалов давлением: тр. ХАИ. – 1982. – Вып. 8. – С. 120–125.

Поступила 15.09.2015

## TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF WATER WELLS REGENERATION BY GAS-IMPULSE METHOD

V. IVASHECHKIN

*The article presents the main principles of calculation of the required pressure created in the cavity of clogged wire screen to ensure its regeneration. Colmatation is schematized as an annular zone including gravel filter pack grouted by colmatage matter and water intake surface which being bonded to one another work jointly under load. Expressions defining the ultimate pressure values for 3 stages of filter work are formulated. The method for calculating the amount of energy necessary to destroy the clogging matter built up in the gravel pack pores and in the well screen is defined. The equation of the balance of energy necessary to deform the wire packing and destroy the clogging matter is formed. An example of calculation of the necessary energy consumption is given. A numerical example of calculation defining the working pressure range and the necessary energy consumption to treat the wire screen with the given strength of the clogged gravel filter pack is considered. It is established that the required pressure value is defined to a great extent by the tensile strength of the water intake surface.*

УДК 628.161

## КОАГУЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ РЕКИ ЗАПАДНАЯ ДВИНА

канд. техн. наук, доц. Д.П. КОМАРОВСКИЙ;  
канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО; Т.М. МОНЯК  
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается коагуляционная обработка воды как начальный этап водоподготовки, от эффективности которой зависит весь дальнейший ход подготовки воды. Представлены результаты пробного коагулирования воды реки Западная Двина, проведенные в разные фазы гидрологического режима реки. В качестве коагулянтов приняты сернокислый алюминий и полиоксихлорид алюминия. Установлена их оптимальная доза, что являлось задачей данного исследования. Выбраны диктующие показатели, по которым определялась оптимальная доза коагулянта, – цветность и перманганатная окисляемость.

Река Западная Двина является источником промышленного водоснабжения крупных предприятий Полоцкого региона, а именно: ОАО «Нафтан», нефтехимический завод «Полимир», ОАО «Полоцк-Стекловолокно» и ТЭЦ города Новополоцка. Основные показатели качества воды в реке Западная Двина (по данным лаборатории завода «Полимир») представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества воды в реке Западная Двина

Наименование показателей	Ед. изм.	Значения
Водородный показатель, рН	ед.	7...8,5
Перманганатная окисляемость	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4...50
Цветность	град.	50...250
Железо	мг/дм <sup>3</sup>	0,2...3
Щелочность	мг-экв/дм <sup>3</sup>	1...3
Мутность	мг/дм <sup>3</sup>	3...9
Сульфаты	мг-экв/дм <sup>3</sup>	0,1...0,4
Хлориды	мг-экв/дм <sup>3</sup>	0,15...0,3

Вода в реке Западная Двина относится к маломутным водам средней, а в отдельные периоды года и высокой цветности [1]. Для снижения цветности и органических загрязнений, характеризующихся перманганатной окисляемостью, на станциях водоподготовки применяют коагуляционную обработку воды [2–5]. Эффективность проведения коагуляционного процесса зависит от многих факторов [2; 3; 6; 7], таких как:

- температура и рН воды;
- наличие необходимого щелочного резерва;
- количество взвешенных и коллоидных частиц;
- концентрация органических соединений в воде;
- правильный выбор дозы коагулянта и интенсивность его смешения с водой;
- наличие предварительного окисления исходной воды.

Сегодня многие промышленные предприятия в коагуляционном процессе в качестве реагента используют сульфат алюминия (СА), однако в паводковый период и в холодное время года очистные сооружения, работающие с использованием данного коагулянта, в большинстве случаев не могут обеспечить необходимое качество очищенной воды, в особенности по перманганатной окисляемости. Для улучшения процесса коагуляции согласно [3–5; 8; 9] применяют высокоэффективные реагенты, например, полиоксихлориды алюминия (ПОХА) – неорганические полимеры, содержащие гидроокись хлорида алюминия. Этот вид коагулянта обладает рядом преимуществ по сравнению с другими реагентами: более широкая область применения в интервале рН; возможность использования при низких температурах; уменьшение дозы вводимого реагента; поставка в готовом рабочем растворе, позволяющая отказаться от процесса растворения коагулянта.

В данной работе приводятся результаты пробного коагулирования воды из Западной Двины коагулянтами – сульфатом алюминия и полиоксихлоридом алюминия. Определение оптимальной их дозы при коагулировании и являлось задачей проводимого исследования. Цветность и перманганатная окисляемость – основные показатели, по которым определялась оптимальная доза коагулянта.

**Исследовательская часть.** В качестве коагулянтов использовали:

- 1) сернокислый алюминий 2 сорта с массовой долей оксида алюминия 16%;
- 2) полиоксихлорид алюминия АКВА-АУРАТ™10 с массовой долей оксида алюминия 10,4% и плотностью 1,26 г/см<sup>3</sup>.

Для проведения пробного коагулирования готовился рабочий раствор коагулянтов с концентрацией активной части по Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, равной 0,1%.

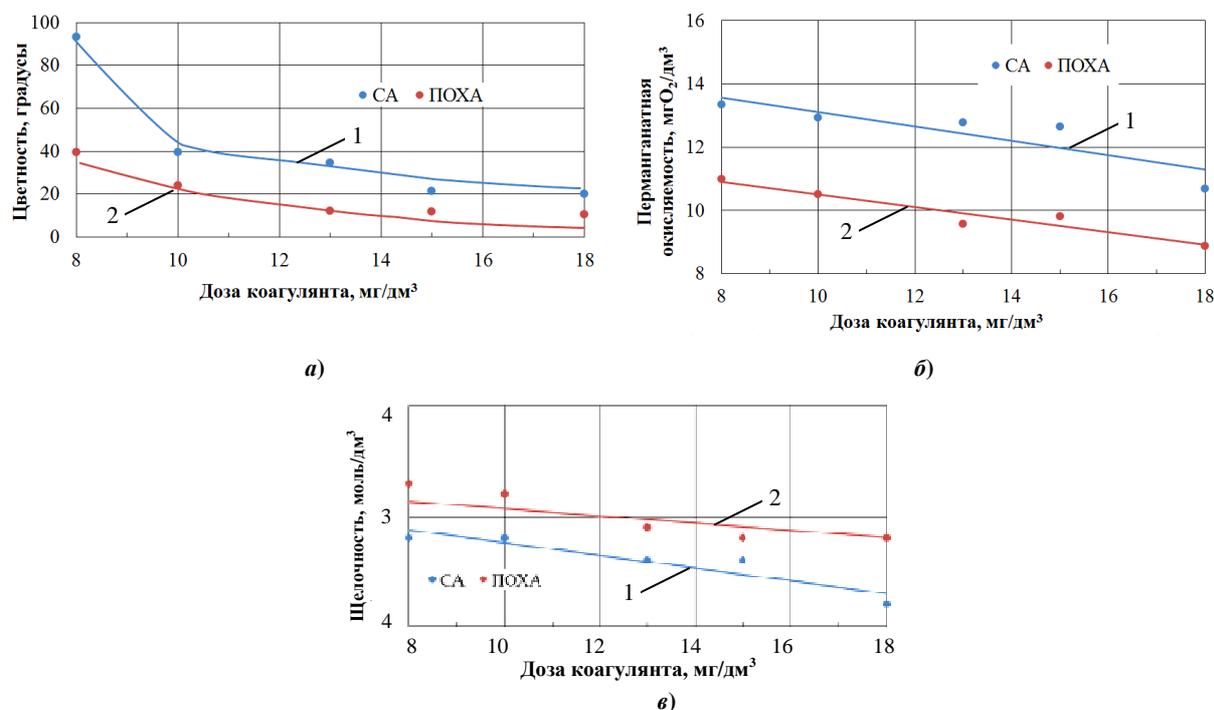
Цветность, перманганатную окисляемость и щелочность воды определяли согласно принятым методикам [10–12]. Мерные цилиндры заполняли исследуемой водой объемом 1000 мл. Назначали 5 доз коагулянта с интервалом 2...5 мг/дм<sup>3</sup>. В 1, 2, ... 5-й мерные цилиндры вводили назначенные дозы коагулянта. Далее стеклянной палочкой осуществляли легкое перемешивание в течение 15 минут, затем – отстаивание в течение 90 минут, визуально наблюдая за процессом осаждения образующейся взвеси. По истечении времени отстаивания из верхней части цилиндров отбирали пробы, фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и проводили определение цветности, перманганатной окисляемости и щелочности.

Речная вода для проведения пробного коагулирования отбиралась из водопровода сырой воды, поступающей на фильтровальную станцию завода «Полимир» ОАО «Нафтан». Отбор воды производился в характерные периоды года: зимнюю межень, весеннее половодье, летне-осеннюю межень. Качество исходной воды приведено в таблице 2. Результаты пробного коагулирования представлены на рисунках 1–3.

**Таблица 2 – Качество исходной воды реки Западная Двина**

Наименование показателей	Дата отбора воды и значения показателей воды		
	13.02.2015	10.04.2015	19.11.2015
рН, ед.	7,5	7,1	7,9
Цветность, град	146,8	295,13	63
Перманганатная окисляемость, гО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	14,87	28,16	10,7
Щелочность, ммоль/дм <sup>3</sup>	3,4	1,6	4,4

На рисунке 1 представлены результаты пробного коагулирования (1 – СА; 2 – ПОХА), проведенного в период зимней межени (13.02.2015).



**а – цветность; б – перманганатная окисляемость; в – щелочность**

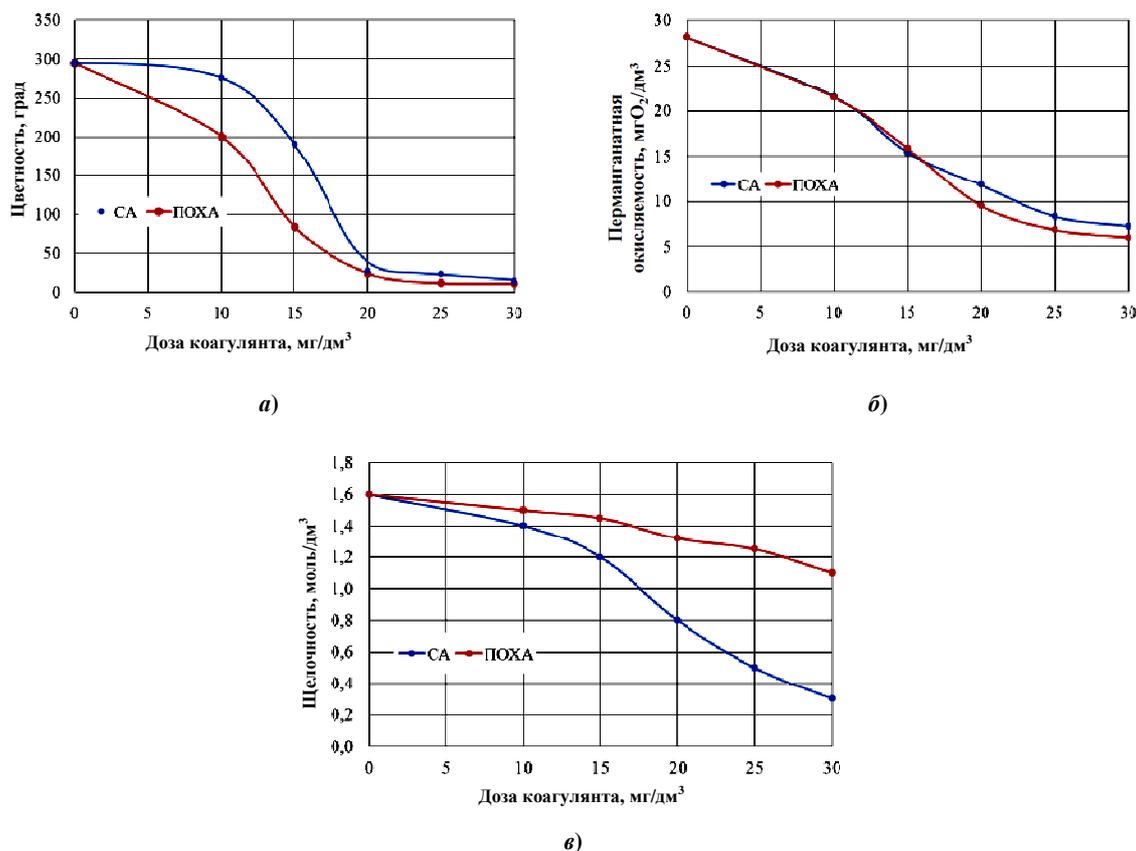
**Рисунок 1 – Зависимость показателей качества воды от дозы коагулянта**

Значения определяемых физико-химических показателей исходной воды представлены в таблице 2. Для снижения цветности оптимальную дозу коагулянтов ПОХА и СА можно принять равной  $10 \text{ мг/дм}^3$ . При этом эффективность применения ПОХА составила 84%, а СА – 73%.

Изменение перманганатной окисляемости в изучаемом диапазоне доз коагулянтов носит линейный характер. Эффективность снижения перманганатной окисляемости при дозе коагулянта  $10 \text{ мг/дм}^3$  составляет для ПОХА – 29%, для СА – 13%; при дозе коагулянта  $18 \text{ мг/дм}^3$  для ПОХА составляет 40%, а для СА – 28%.

Положительным моментом для коагулянта ПОХА можно отметить тот факт, что при его применении щелочность воды снижается в меньшей степени, чем при СА.

На рисунке 2 проиллюстрированы результаты пробного коагулирования воды, отобранной в период весеннего половодья на реке Западная Двина (10.04.2015). Физико-химические показатели исходной воды представлены в таблице 2.



а – цветность; б – перманганатная окисляемость; в – щелочность

Рисунок 2 – Зависимость показателей качества воды от дозы коагулянта

Из анализа коагуляционных кривых изменения цветности воды от дозы коагулянта (рис. 2, а) следует, что оптимальной дозой для коагулянтов СА и ПОХА является доза  $20 \text{ мг/дм}^3$ . Полученная доза в 2 раза больше принятой при коагулировании воды в зимний период, что связано с большей загрязненностью воды в этот период (см. табл. 2). Эффективность применения рассматриваемых коагулянтов при дозе  $20 \text{ мг/дм}^3$  практически одинаковая и составляет для ПОХА – 92%, а для СА – 91%.

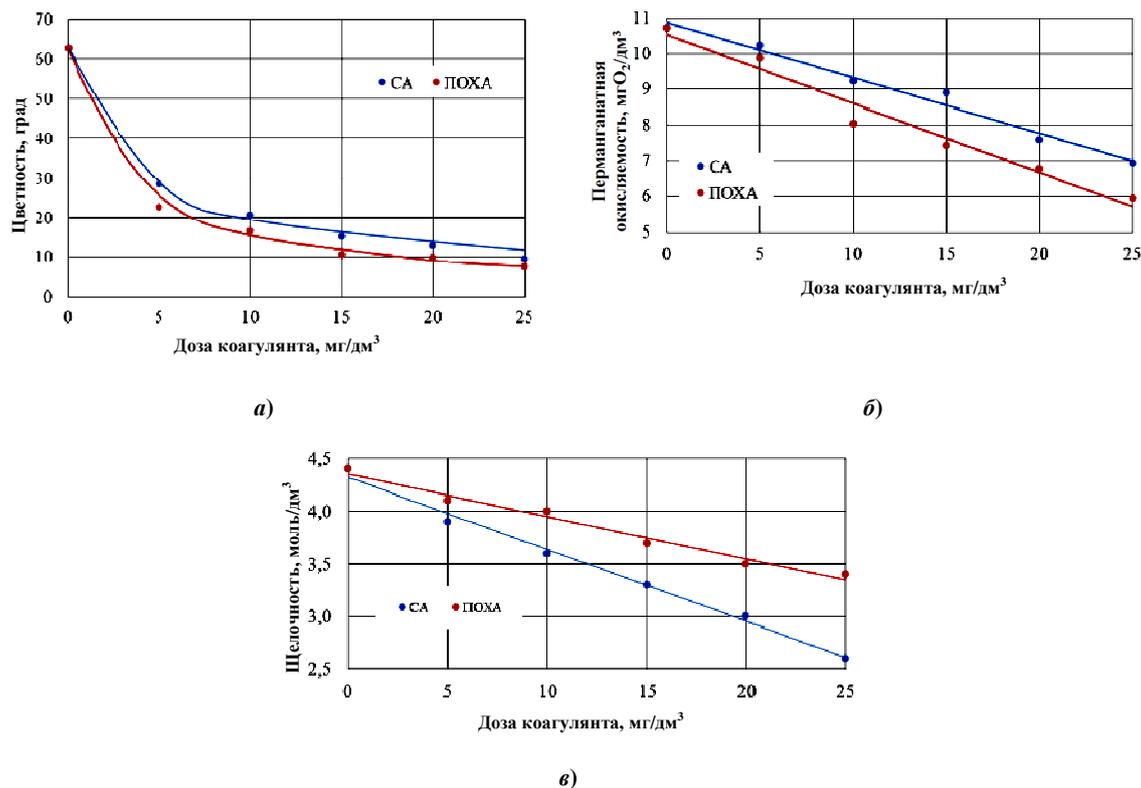
Для снижения перманганатной окисляемости оптимальную дозу коагулянтов можно также принять  $20 \text{ мг/дм}^3$ . Эффективность снижения данного показателя составляет для ПОХА – 66%, для СА – 58%.

Необходимо отметить резкое снижение щёлочности воды при применении коагулянта СА до значений  $0,8 \text{ ммоль/дм}^3$ , что может свидетельствовать о необходимости ввода подщелачивающего реагента.

В период осенней межени отбор воды из реки Западная Двина проводился 19.11.2015.

Значения определяемых физико-химических показателей исходной воды показаны в таблице 2.

На рисунке 3 представлены результаты пробного коагулирования воды.



*a* – цветность; *б* – перманганатная окисляемость; *в* – щелочность

Рисунок 3 – Зависимость показателей качества воды от дозы коагулянта

Применение коагулянтов СА и ПОХА показало практически одинаковую интенсивность снижения цветности (см. рис. 3, *a*). Оптимальная доза коагулянтов для снижения цветности составила 5 мг/дм<sup>3</sup>, эффективность при этой дозе для ПОХА – 64%, для СА – 55%.

Снижение перманганатной окисляемости имеет линейный характер на всем диапазоне изменения дозы коагулянтов (см. рис. 3, *б*). Применение рассматриваемых коагулянтов не показало их высокую эффективность снижения перманганатной окисляемости. При максимальной дозе 25 мг/дм<sup>3</sup> эффективность ПОХА составила – 45%, СА – 35%. По-прежнему щелочность коагулированной воды ниже при использовании СА, чем при ПОХА, но остается достаточной, чтобы воду не подщелачивать.

**Заключение.** Пробное коагулирование воды реки Западная Двина в периоды зимней межени, весеннего половодья и осенней межени с применением коагулянтов ПОХА и СА показало:

- 1) оптимальные дозы применения коагулянтов составляют: в период зимней межени – 10 мг/дм<sup>3</sup>; весеннего половодья – 20 мг/дм<sup>3</sup>; осенней межени – 5 мг/дм<sup>3</sup>.
- 2) коагулянт ПОХА обладает большей эффективностью по снижению цветности на 7...11% и по снижению перманганатной окисляемости на 2...16% по сравнению с СА. Применение коагулянтов дает больший эффект по снижению цветности воды, чем перманганатной окисляемости;
- 3) снижение щелочности воды меньше при применении ПОХА, особенно в период весеннего половодья, что не требует подщелачивания воды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сооружения водоподготовки. Строительные нормы и правила: ТКП 45-4.01-31-2009. – Утв. и введен в действие приказом Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 6 июля 2009 г. № 216.
2. Драгинский, В.Л. Коагуляция в технологии очистки природных вод / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева, С.В. Гетманцев. – М., 2005. – 576 с.
3. Потапов, В.В. Улучшение качества очистки природных вод с применением реагентов нового поколения / Б.Н. Потапов, А.Е. Бровкин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 7. – С. 15–21.

4. Гетманцев, С.В. Коагуляционная водообработка на Таманском групповом водопроводе / С.В. Гетманцев, С.Н. Линевич, Л.С. Казанок // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 9. – С. 30–33.
5. Исследование процессов коагуляции и обеззараживания при очистке воды поверхностных источников / И.Н. Мясников [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – № 9. – С. 13–15.
6. Сомов, М.А. Водоснабжение: учебник / М.А. Сомов, Л.А. Квитка. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 278 с.
7. Фрог, Б.Н. Водоподготовка: учеб. пособие для вузов / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 680 с.
8. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды / С.М. Эпоян [и др.] Харьков: ХНАГХ, 2013. – 190 с.
9. Эффективность использования полиоксихлоридов алюминия при очистке природных вод / А.К. Кинебас [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – № 2013. – № 9. – С. 52–56.
10. Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости: ГОСТ Р 55684-2013. – Введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2013 г. № 1320-ст.
11. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности: ГОСТ 3351-74. – Введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 1 июля 1975 г. № 1309-ст.
12. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов: ГОСТ Р 52963-2008. – Введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 сентября 2008 г. № 224-ст.

Поступила 08.12.2015

## COAGULATION WATER TREATMENT OF THE RIVER WESTERN DVINA

**D. KOMAROVSKY, V. USCHENKO, T. MONYAK**

*Coagulation treatment of water occurs at the initial stage of the water treatment and its effectiveness influences on the entire future course of water treatment. The article presents the results of a test of water coagulation of the river Western Dvina which was conducted in different phases of the hydrological regime of the river. Aluminum sulfate and aluminum polyoxochloride were taken as a coagulant. The objective of the work was to determine the optimal dose of coagulant. Color and permanganate oxidation were chosen as dictating indicators which help to determine the optimal dose of coagulant.*

УДК 628.544

## СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГОЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. В.Л. ГРУЗИНОВА*

*(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель);*

*канд. техн. наук В.И. РОМАНОВСКИЙ*

*(Белорусский государственный технологический университет, Минск)*

*Анализируется работа очистных сооружений производственных нефтесодержащих сточных вод. Рассматривается основная проблема, возникающая в узле физико-химической очистки, в частности при использовании низкоактивных по отношению к нефтепродуктам фильтрующих материалов. Отмечено, что лучшими фильтрующими материалами являются угольные сорбенты, а Республика Беларусь – крупный производитель угольных волокон. Представлены результаты определения сорбционных свойств и эксплуатационных характеристик некоторых угольных волокнистых материалов, таких как массовая емкость поглощения нефтепродуктов в статических условиях, зависимость скорости фильтрования от толщины слоя загрузки и гидравлического напора перед ней, а также эффективность очистки сточной воды от нефтепродуктов. Выполнен сравнительный анализ нефтеемкости исследуемых материалов и промышленно выпускаемых в странах СНГ сорбционных материалов.*

**Введение.** Одним из наиболее распространенных антропогенных факторов загрязнения окружающей среды являются нефтесодержащие сточные воды, образующиеся в результате производственной деятельности ремонтно-транспортных, машиностроительных, нефтеперерабатывающих предприятий.

Для очистки сточных вод от нефтепродуктов используют механический, физико-химический и биологический методы. Наибольшее распространение в системах очистки нефтесодержащих сточных вод нашли механический и физико-химический методы, поскольку присутствующие минеральные масла не только не являются биоразлагаемыми веществами, но и вызывают дестабилизацию активного ила и нарушение основных процессов в сооружениях биологической очистки.

При обследовании очистных сооружений ряда предприятий выявлена проблема низкой эффективности работы узла физико-химической очистки нефтесодержащих сточных вод. Результатом применения низкоактивных по отношению к нефтепродуктам материалов являются повышенный сброс загрязняющих веществ в городскую сеть водоотведения, нарушение технологического режима работы городских очистных сооружений, снижение их эффективности и загрязнение органическими веществами водных объектов – приемников очищенных сточных вод. К предприятиям, осуществляющим сброс сточных вод с превышением допустимых концентраций загрязняющих веществ, применяются повышенные тарифы и штрафные санкции за нарушение условий сброса сточных вод.

Наличие этой проблемы определило *актуальность* исследований по поиску новых материалов, обладающих высокой активностью по отношению к извлекаемым нефтепродуктам и позволяющих повысить эффективность работы очистных сооружений в целом. Одновременно необходимо учитывать, что внедрение новой технологии может вызывать увеличение стоимости очистки воды, в связи с чем работа направлена на поиск не только эффективных, но и экономически обоснованных решений. В этом случае при решении проблемы повышения эффективности очистки нефтесодержащих сточных вод наиболее целесообразным является замена используемых материалов без изменения технологической схемы.

Известно, что лучшими фильтрующими материалами являются угольные сорбенты, а Республика Беларусь выступает крупным производителем угольных волокон. Ввиду этого в работе представлен анализ сорбционных свойств, эксплуатационных характеристик угольных волокон и определена возможность использования их в качестве сорбционного материала для очистки сточных вод от нефтепродуктов [1].

**Характеристики угольных волокон.** В настоящее время в мире производится и используется для удаления нефтепродуктов несколько сотен различных сорбционных материалов, которые подразделяют:

- на неорганические (силикагели, алюмогели, перлит, вермикулит, различные сорта глины);
- природные – органические и органоминеральные (солома, кора, торф, древесная стружка) и синтетические (полиуретан, полипропилен, полистирол, полиакриламидный гель) материалы;
- углеродные и не углеродные (для их производства используется древесина, уголь, антрацит, торф, полимеры, промышленные отходы);
- порошкообразные (или гранулированные) и волокнистые.

Объектами исследований являлись углеродные волокна и ткани производства ОАО «Светлогорск-Химволокно», характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых материалов

Наименование материала	Применение	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г, не менее	Адсорбционная активность по йоду, %, не менее
Трикожажное углеродное полотно «Урал-ТР», углеродная ткань «Урал ЛО-22 ЭХО»	Углерод-углеродные и пироуглеродные композиты. Высокотемпературная изоляция. Антикоррозионные покрытия и футеровка. Носители катализаторов. Электрохимия: трехмерные электроды (для осаждения золота, платины, палладия). Гибкие и жесткие электронагреватели. Электротермические маты. Фильтры для агрессивных сред. Радиопоглощающие материалы (EMI-shielding)	680...850		
Углеволокнистый сорбент, ткань САУТ-1С	Сорбционно-фильтрующий материал для изготовления средств индивидуальной защиты (СИЗ) и спецодежды для работы в условиях контакта с сильнодействующими ядовитыми веществами (СДЯВ). Устройств для рекуперации органических растворителей (дихлорэтан, бензин, ацетон и др.). Очистка гальванических растворов от органических примесей. Системы очистки воздуха и поглотители запаха. Фильтры для питьевой воды. Фильтр-материал для газоочистки при сварочных работах. Фильтр-материал для курительных комнат; поглощение запаха в холодильниках. Эффективная тонкая очистка в ликероводочном производстве и выпуске лимонной кислоты	130	200	105
Ткань углеродная техническая Т-1-15Н	Защитная накладка для спецодежды: алюминий, металлургия, сварка, нефтепромысел, средства индивидуальной защиты рук от высоких температур и брызг металла, рукавные фильтры для горячих газов, тентов для высокотемпературных перевозок (асфальт, шихта, внутрицеховой транспорт)	170...1100		
Углеволокнистый войлок «КАРБОПОН-В-АКТИВ»	Термоизоляция вакуумных печей и печей инертной среды, тепловых узлов. Электрохимия: трехмерные электроды (для осаждения золота, платины, палладия). Адсорбция нейтронов в ядерных реакторах. Фильтры для агрессивных сред. Радиопоглощающие материалы. Фильтры для расплавленных металлов. Основа для нанесения катализаторов. Антикоррозионная футеровка емкостей. Защита при пайке и сварке	290..1000	200	105
Углеволокнистый сорбент «БУСОФИТ-Т-040»	Фильтр-материал для органических примесей из технологических растворов и сточных вод (особенно в области низких концентраций). Устройств для рекуперации органических растворителей (дихлорэтан, бензин, ацетон и др.). Очистка гальванических растворов от органических примесей. Нефтеловушки для АЗС, автомоек, нефтеналивных территорий. Системы очистки воздуха и поглотители запаха. Суперконденсаторы на двойном электрическом слое. Фильтры для питьевой воды. Сорбционно-фильтрующий материал для изготовления СИЗ и спецодежды для работы в условиях контакта со СДЯВ. Фильтр-материал для газоочистки при сварочных работах. Фильтр-материал для курительных комнат; использование в сигаретных фильтрах. Поглощение запаха в холодильниках. Высокоэффективная очистка в производстве ликероводочной продукции и лимонной кислоты	240	250	110

Окончание таблицы 1

Наименование материала	Применение	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г, не менее	Адсорбционная активность по йоду, %, не менее
Углеволокнистый сорбент «Бусофиг Л-0,3-135С»	Фильтр-материал для органических примесей из технологических растворов и сточных вод (особенно в области низких концентраций). Устройства для рекуперации органических растворителей (дихлорэтан, бензин, ацетон и др.). Очистка гальванических растворов от органических примесей. Нефтеловушки для автозаправочных станций, автомоек, нефтеналивных территорий. Системы очистки воздуха и поглотители запаха. Суперконденсаторы на двойном электрическом слое. Фильтры для питьевой воды. Сорбционно-фильтрующий материал для изготовления СИЗ и спецодежды для работы в условиях контакта со СДЯВ. Фильтр-материал для газоочистки при сварочных работах. Фильтр-материал для курительных комнат; использование в сигаретных фильтрах. Поглощение запаха в холодильниках. Высокоэффективная очистка в производстве ликероводочной продукции и лимонной кислоты	750	400	130

Как видно из таблицы 1, применение углеродных волокон указанных марок для очистки сточных вод от нефтепродуктов является новым направлением их использования.

**Методики исследований.** Определение содержания нефтепродуктов в воде проводили по методике № 2.2.34.9 «Методика выполнения измерений концентраций нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» [2].

Исследования по определению массовой емкости поглощения проводились с использованием модельных сточных вод в статических условиях. Массовая емкость поглощения вычислялась по формуле

$$e = \frac{m_{\text{нп}}}{m_{\text{сор}}},$$

где  $m_{\text{нп}}$  – масса поглощенного нефтепродукта, г;  $m_{\text{сор}}$  – масса использованного сорбента, г.

#### Результаты исследований характеристик углеродных материалов

**при извлечении нефтепродуктов из сточных вод.** Важными показателями для сравнения сорбционных материалов являются: нефтеемкость, зависимость скорости фильтрования от толщины слоя загрузки и гидравлического напора перед ней, степень очистки по нефтепродуктам.

Значения полученных величин нефтеемкости исследуемых углеродных материалов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Массовая емкость поглощения исследуемых углеродных материалов

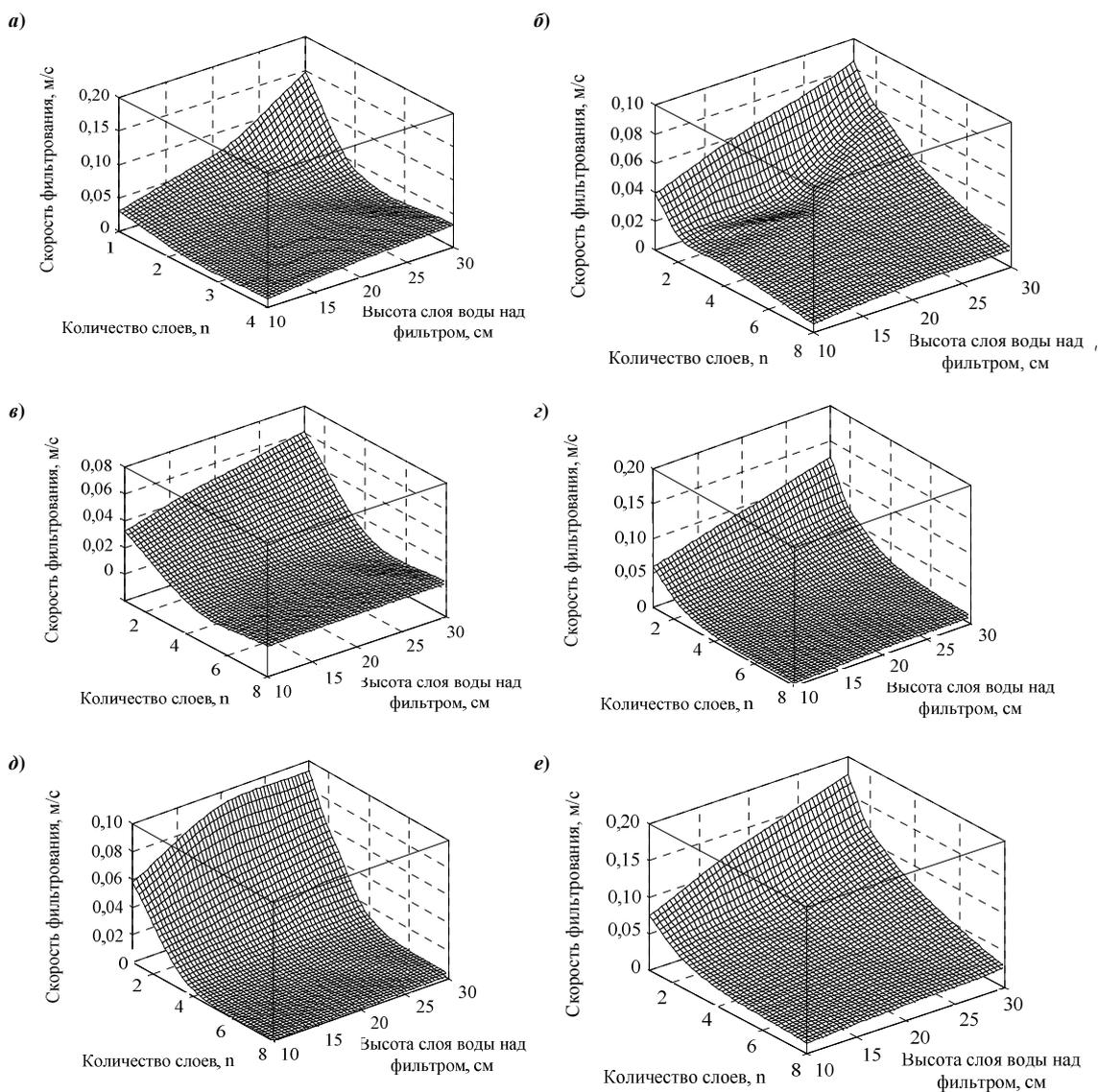
Образец	Массовая емкость поглощения, г/г
Трикотажное углеродное полотно «Урал-ТР»	2,97
Углеволокнистый сорбент, ткань САУТ-1С	4,77
Углеволокнистый сорбент «БУСОФИТ-Т-040»	3,81
Углеволокнистый сорбент «БУСОФИТ Л-0,3-135С»	3,39
Углеродная ткань «Урал ЛО-22 ЭХО»	6,05
Ткань углеродная техническая Т-1-15Н	1,98
Углеволокнистый войлок «КАРБОПОН-В-АКТИВ»	15,35

Для сравнения приведем значения нефтеемкости некоторых сорбционных материалов, выпускаемых в странах СНГ (табл. 3).

Таблица 3 – Нефтеемкость рыночных сорбентов

Образец	Нефтеемкость, г/г
МАУ-2А	0,38
С-Верад	2
АУ-7	4,7
Пиросорб	8
Ньюсорб	9
Сорбент постоянной плавучести OPUB	13
Нетканый сорбент Экосорб	15
Сорбент ОМУ-1	18
Сорбент СТГ	30

Из представленных данных следует, что исследуемые сорбционные материалы обладают средними значениями нефтеемкости среди сравниваемых сорбентов. Определение скорости фильтрации проводили для разной толщины слоя исследуемого материала и гидравлического напора перед ним. По результатам исследований построены графические зависимости, проиллюстрированные на рисунке.



*a* – углеволокнистый войлок «КАРБОПОН-В-АКТИВ»; *б* – ткань углеродная техническая Т-1-15Н;  
*в* – углеродная ткань «Урал ЛО-22 ЭХО»; *г* – углеволокнистый сорбент «Бусофит Л-0,3-135С»;  
*д* – углеволокнистый сорбент «БУСОФИТ-Т-040»; *е* – углеволокнистый сорбент, ткань САУТ-1С

Зависимости скорости фильтрации от количества слоев фильтрующего материала и высоты слоя воды

В таблице 4 представлены результаты определения остаточной концентрации нефтепродуктов в сточной воде при использовании исследуемых материалов. Начальная концентрация нефтепродуктов в модельной сточной воде составляет 33,3 мг/дм<sup>3</sup>.

**Таблица 4 – Остаточная концентрация нефтепродуктов в составе сточных вод**

Марка фильтра	Количество слоев	Концентрация нефтепродуктов после фильтра, мг/дм <sup>3</sup>	Эффективность очистки, %
Углеволоконный войлок «КАРБОПОН-В-АКТИВ»	2	23,5	29,3
	4	15,5	53,3
	8	1,0	96,9
Марка фильтра	Количество слоев	Концентрация нефтепродуктов после фильтра, мг/дм <sup>3</sup>	Эффективность очистки, %
Ткань углеродная техническая Т-1-15Н	2	26,6	19,9
	4	21,3	36,1
	8	11,4	65,7
Углеродная ткань «Урал ЛО-22 ЭХО»	2	25,8	22,4
	4	19,7	40,8
	8	8,6	74,2
Углеволоконный сорбент «Бусофит Л-0,3-135С»	2	26,5	20,4
	4	20,1	39,6
	8	9,2	72,7
Углеволоконный сорбент «БУСОФИТ-Т-040»	2	26,1	21,6
	4	20,4	38,7
	8	9,6	71,2

**Заключение.** Результаты выполненных исследований по удалению из производственных сточных вод нефтепродуктов показали, что углеволоконный войлок «КАРБОПОН-В-АКТИВ» обладает самой высокой емкостью поглощения нефтепродуктов (15,35 г/г) и эффективностью очистки (96,9%). По сравнению с промышленно выпускаемыми неткаными синтетическими сорбентами нефтепродуктов, полученными методом пневмоэкструзии из полипропилена и обладающими емкостью поглощения в пределах от 11 до 13,5 г/г, «КАРБОПОН-В-АКТИВ» целесообразно применять для очистки производственных нефтесодержащих сточных вод. Очевидно, что для снижения негативного воздействия транспортного комплекса на окружающую среду и поддержания благоприятной экологической обстановки производственные сточные воды должны подвергаться качественной очистке с применением последних достижений в этой области. Совершенствование технологии очистки нефтесодержащих сточных вод позволит повторно использовать очищенную воду в производственном цикле предприятия, сократить водопотребление и связанные с этим затраты, что является немаловажным в рамках энергосберегающей политики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грузинова, В.Л. Очистка нефтесодержащих сточных вод локомотивных депо с применением коагулянтов и отходов синтетических материалов: дис. ...канд. техн. наук: 05.23.04 / В.Л. Грузинова; БГТУ. – Минск, 2014. – 205 с.
2. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02». ПНД Ф 14.1:2.4.128-98. – М.: Госкомитет Рос. Федерации по ООС, 1998. – 18 с.

Поступила 06.12.2015

#### SORPTION PROPERTIES AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF COAL FIBROUS MATERIALS

V. GRUZINOVA, V. ROMANOVSKIJ

*The paper presents the results of the analysis of treatment facilities of industrial oily waste water. It is shown that the main problem occurs at the node of physico-chemical treatment, in particular using low-active filtering materials in relative to oil-products. The best filter materials are carbon sorbents, and the Republic of Belarus is a major producer of carbon fibers. The results of determination of the sorption properties and performance characteristics of carbon fibrous materials are presented, such as oil intensity, filtration rate dependence on the layer thickness and hydraulic pressure in front of it, as well as the degree of model waste water purification by oil-products. A comparative analysis of oil capacity of the studied sorption materials which are industrially produced in the CIS countries are presented.*

## ГЕОДЕЗИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.7

### РАСЧЕТ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СНИМКА

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

*Анализируется разрешающая способность снимка и её роль в фотограмметрии, что особенно важно при дешифрировании. Делается вывод о необходимости знания разрешающей способности полученных аэроснимков или тех, которые будут получены. На разрешающую способность влияют такие факторы, как абберация объектива, разрешающая способность фотопленки или ПЗС-приемника, атмосфера, и другие. Рассматриваются разные пути предрасчета разрешающей способности. Расчеты показали, что предрасчитать разрешающую способность с достаточной точностью нельзя, так как каждый объектив уникален и имеет свою разрешающую способность. В ходе калибровки аэрокамеры необходимо определять не только дисторсию, но и разрешающую способность системы «объектив – фотопленка», тогда учет влияния атмосферы сдвига изображения и других факторов не составит труда.*

Расчет разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения разрешающей способности  $P_R$  должен выполняться в соответствии с требованиями Инструкции [1] по формуле:

$$P_R = \frac{0,4}{R}, \quad (1)$$

где  $R$  – разрешающая способность исходного аэрофотоснимка.

В работе [2] говорится о том, что расчет разрешения при сканировании аэрофотоснимков для обеспечения разрешающей способности  $P_R$  должен выполняться по формуле:

$$P_R = \frac{0,5}{R}. \quad (2)$$

В обоих случаях необходимо знать разрешающую способность снимка.

Пример расчета разрешения при сканировании для обеспечения разрешающей способности аэрофотоснимка рассматривается в инструкции [1], где значение  $R$  принято равным  $40 \text{ мм}^{-1}$ . Однако, как получить разрешающую способность снимка и почему принято именно такое значение  $R$ , не указано. В работе [3] отмечено, что разрешающая способность снимка составляет  $50 \text{ мм}^{-1}$ , и тоже без пояснения.

Полагаем, что значение разрешающей способности не может быть постоянной величиной, так как на разрешающую способность аэрофотоснимка влияют многие факторы: разрешающая способность фотопленки, которая зависит от ее светочувствительности; абберации объектива, которые также не являются постоянными для всех объективов; слой атмосферы и другие.

Строгое определение разрешающей способности применительно к аэросистемам приведено в ГОСТ 23935-79 [4]: «Разрешающая способность – это характеристика аэрофотоаппарата, оптико-фотографической системы, аэрофотоматериала, определяемая максимальной пространственной частотой периодической решетки, штрихи которой визуально различимы в фотографическом изображении, образованном данной системой, при использовании в качестве объекта стандартной миры заданного контраста». Стандартное обозначение разрешающей способности – латинская буква  $R$  [4].

Как свидетельствует работа [5], разрешающая способность является эмпирической оценкой, получаемой при визуальном наблюдении. Последнее является ее достоинством и недостатком одновременно: достоинство – эта характеристика достаточно наглядна, имеет простой физический смысл и автоматически включает в себя пороговые свойства зрительного анализатора; недостаток – отсутствие методик анализа и синтеза сложных систем непосредственно по этой характеристике, которые имели бы достаточную для практики точность [5].

Автор работы [5] отмечает, что критерий «разрешающая способность» по существу носит статистический характер, так как он получается усреднением нескольких наблюдений изображений тест-объекта, полученных оцениваемой системой. Величина вероятности правильного определения разрешающей способности должна быть порядка 0,9, а относительный разброс этой величины – порядка 10% [5]. К тому же в разных частях кадра разрешающие способности разные, поэтому при определении разре-

шающей способности, кроме распределения её по полю изображения приводят средневзвешенное значение или указывают значения разрешающей способности в центре и на краях поля изображения.

Существует несколько способов для определения разрешающей способности. Наиболее распространены следующие методы определения разрешающей способности [6–10]: по миру; по ширине тонких линий; по ширине пограничной линии; по оптимальному увеличению; с использованием функции передачи модуляции. Известны и другие методы определения разрешающей способности. Самый точный способ, когда выполняют съемку специальной миры. Однако способ этот применяют редко, так как требует больших финансовых и временных затрат. К тому же условия аэрофотосъемки могут отличаться от условий съемки миры, а значит полученные результаты значений разрешающей способности будут с погрешностями. Кроме того, в отдельных случаях необходимо предрасчитать, какая будет разрешающая способность.

Перечисленные методы требуют либо больших затрат, либо специального оборудования, или обеспечивают малую точность. Наиболее близкое значение разрешающей способности к реальной будет получено с использованием функции передачи модуляции, как справедливо утверждают авторы работ [8–10]. Этому методу мы и отдадим предпочтение.

Функция передачи модуляции представляет собой совокупность определенных для различных частот  $N$  коэффициентов  $T(N)$ , показывающих степень уменьшения интенсивностей (контраста) в изображении при какой-либо частоте по сравнению с исходным контрастом и, соответственно, степень уменьшения разрешающей способности.

Множитель  $T(N)$  называется по-разному [10]: функцией передачи контраста (ФПК), функцией передачи модуляции (ФПМ), частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), контрастно-частотной характеристикой (КЧХ). Общепринятого названия нет. Мы в дальнейшем функцию  $T(N)$  будем называть функцией передачи модуляции, которая имеет следующий вид [10]:

$$T(N) = T(N)_o \cdot T(N)_\phi \cdot T(N)_a \cdot T(N)_{\text{сдвиг}} \dots, \quad (3)$$

где  $T(N)$  – результирующая ФПМ системы;  $T(N)_o$  – ФПМ объектива;  $T(N)_\phi$  – ФПМ аэрофотоэмульсии;  $T(N)_a$  – ФПМ, описывающая влияние атмосферы;  $T(N)_{\text{сдвиг}}$  – ФПМ, описывающая влияние нерезкости изображения, обусловленной перемещением аэрофотокамеры при экспонировании.

В выражении (3) перечислены основные причины, которые вызовут снижение разрешающей способности. Входящие в формулу (3) коэффициенты снизят разрешающую способность пропорционально рассчитанной величине.

Предельно возможное значение разрешающей способности объектива, которую называют дифракционной  $R_D$ , можно получить [8; 9; 11; 15] по формуле:

$$R_D = \frac{1}{1,22\lambda} \frac{d}{f} = \frac{1}{1,22\lambda n_0}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны света. Среднее значение световой волны  $\lambda = 0,555$  мкм [8; 9; 10; 15]. Это значение длины световой волны и будем использовать в расчетах;  $d$  – диаметр входного отверстия объектива;

$\frac{d}{f} = \frac{1}{n_0}$  – относительное отверстие объектива.

Расчеты будем выполнять для оборудования, используемого в Беларуси, то есть для аэрофотоаппарата (АФА) RC-30 швейцарской фирмы *Leica* с фокусным расстоянием  $f = 153$  мм, форматом кадра  $23 \times 23$  см. Фотографирование выполняется при относительном отверстии объектива  $\frac{1}{n_0} = \frac{1}{4}$ .

Подставив принятые значения в формулу (4) получим  $R_D = 396 \text{ мм}^{-1}$ .

Аберрации объектива снизят разрешающую способность.

Функция передачи модуляции объектива  $T(N)_o$ , учитывающая аберрации объектива, может быть вычислена согласно [12] как

$$T(N)_o = \left(1 - \frac{4}{\pi} \lambda n_0 N\right) e^{-\frac{c f N n_0^2 \beta}{n_0^2}}, \quad (5)$$

где  $c = 0,0035$  – постоянный коэффициент;  $\beta$  – половина угла поля зрения (для АФА – RC-30 с фокусным расстоянием  $f = 153$  мм,  $\beta = 45^\circ$ );  $e$  – основание натурального логарифма;  $N$  – пространственная частота, которая зависит от характера снимаемого объекта, его освещенности и других факторов.

В случае если отсутствуют данные калибровки объектива, значения разрешающей способности объектива с учетом аберраций можно рассчитать по [8; 10] следующим образом:

$$R_o = T(N)_o R_D. \quad (6)$$

Вычисления сделаем для пространственной частоты  $30 \text{ мм}^{-1}$ .

Для расчета примем АФА с фокусным расстоянием  $153 \text{ мм}$ ,  $\beta = 45^\circ$  и АФА с фокусными расстояниями  $f = 88 \text{ мм}$ ,  $213 \text{ мм}$  и  $303 \text{ мм}$ . Половина значения угла поля зрения  $\beta$  зависит от величины фокусного расстояния. Данные приведены в таблице 1 [13], как и результаты вычислений  $T(N)_o$  и  $R_o$  по формулам (5) и (6).

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $T(N)_o$  и  $R_o$  для пространственной частоты  $N = 30 \text{ мм}^{-1}$

$f, \text{ мм}$	88	153	213	303
$\beta^\circ$	60	45	35	27,5
$T(N)_o$	0,1618	0,3353	0,4612	0,5339
$R_o, \text{ мм}^{-1}$	64	132	183	211

Как видим, с увеличением фокусного расстояния увеличиваются и коэффициент  $T(N)_o$ , и разрешающая способность объектива  $R_o$ . В работе [11] также указывается на то, что с уменьшением угла поля зрения  $2\beta$  влияние aberrаций уменьшается. В работе [14] приводятся значения разрешающей способности в пределах всего поля зрения для АФА с фокусными расстояниями  $f = 88; 153; \text{ и } 303 \text{ мм}$  при относительном отверстии  $1:n_o = 1:4$  (табл. 2).

Таблица 2 – Значения разрешающей способности для АФА с разными фокусными расстояниями

$f, \text{ мм}$	88	153	303
$R, \text{ мм}^{-1}$	30...100	66...150	77...118

В таблице 2 даны значения разрешающей способности на краю снимка и в центре. Видим, что при увеличении фокусного расстояния с  $88$  до  $153 \text{ мм}$  разрешающая способность увеличилась, однако при увеличении фокусного расстояния до  $303 \text{ мм}$  в центре поля зрения разрешающая способность оказалась ниже, чем при  $f = 153 \text{ мм}$ . Возможно, что в работе [14] имеет место опечатка или у АФА RC-30 с фокусным расстоянием  $f = 153 \text{ мм}$  более тщательно откорректированы aberrации, так как этот аэрофотоаппарат находит наиболее широкое применение.

Формула (5) сложна для вычислений. Кроме того, сложно выбрать и пространственную частоту  $N$ .

В работе [10] наличие остаточных aberrаций в оптической системе, снижающих разрешающую способность для приближенного расчета, рекомендовано выполнять по формуле:

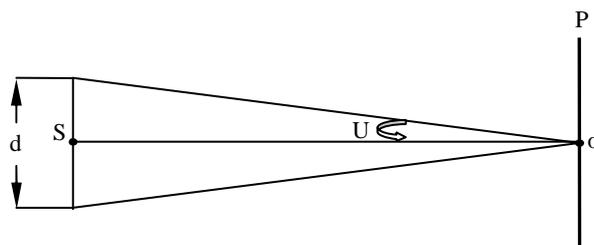
$$R'_o = \frac{1}{\sigma} \approx \frac{U}{4\epsilon}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – средний размер диаметров кружков рассеяния, обусловленных aberrациями;  $\epsilon$  – волновая aberrация, используемая в качестве обобщенной характеристики остаточных aberrаций, которая составляет [10]:  $\epsilon = 0,25\lambda$  – для оптических систем с отличной коррекцией aberrаций;  $\epsilon = 0,5\lambda$  – для хорошей коррекции aberrаций. При конструировании аэрофотоаппаратов используют объектив с очень хорошей коррекцией aberrаций, поэтому примем  $\epsilon = 0,5\lambda$ ;  $U$  – апертурный угол в пространстве изображений, определяемый как отношение радиуса выходного зрачка к расстоянию от зрачка до изображения;

$$\sin U \approx U = \frac{d}{2f}. \quad (8)$$

Как видим, в формуле (8) имеется знак приближенно:  $\sin U \approx U$ .

Поясним апертурный угол  $U$  на рисунке.



$P$  – плоскость снимка;  $o$  – главная точка снимка;  $S$  – задняя узловая точка объектива;  $d$  – диаметр выходного зрачка;  $S_o$  – фокусное расстояние

Исходя из рисунка,  $tgU = \frac{d}{2f} = 0,1257$ . Следовательно,  $U = 7^{\circ}10'$  для всех рассматриваемых в таблице 2 аэрофотоаппаратов.

В формуле (8) требуется знать  $\sin U$ . Значение  $\sin 7^{\circ}10' = 0,1248$ . Небольшие расхождения в последних знаках не повлияли на дальнейшие вычисления. Кроме того, в формуле (8)  $\sin U \approx U = \frac{7^{\circ}10'}{\rho} = 0,1251$ , что также не повлияет на дальнейшие вычисления.

Выполним расчет разрешающей способности объектива  $R'_o$  по формуле (8) при относительном отверстии объектива  $1:n_o = 1:4$  и при отличной коррекции объектива. Получили одинаковые значения  $R'_o = 225 \text{ мм}^{-1}$  при отличной коррекции объектива для всех аэрофотоаппаратов с фокусными расстояниями  $f = 88 \text{ мм}$ ,  $153 \text{ мм}$  и  $303 \text{ мм}$ , так как относительные отверстия  $\frac{d}{f} = \frac{1}{n_o}$  для перечисленных фокусных расстояний одинаковы и равны  $\frac{1}{n_o} = \frac{1}{4}$ . Однако это не так, о чем свидетельствуют данные таблицы 2.

В таблице 2 приведены значения разрешающей способности с учетом разрешающей способности фотопленки Panatomic 2412  $R_{\phi} = 400 \text{ мм}^{-1}$  [14], что снизит результирующую разрешающую способность.

Влияние разрешающей способности фотопленки  $R_{\phi}$  для  $R'_o = 225 \text{ мм}^{-1}$  учтем по формуле [12; 15]:

$$R_{o/\phi} = R_{\phi} \left(1 - e^{-\frac{R_o}{R_{\phi}}}\right) = 172 \text{ мм}^{-1}, \quad (9)$$

где  $R_{o/\phi}$  – совместное влияние на разрешающую способность объектива и фотопленки.

Сопоставив полученный результат с данными таблицы 2, получим завышенное значение разрешающей способности системы «объектив – фотопленка». Возможно, коррекция aberrаций объектива не была отличной. При хорошей коррекции aberrаций  $R'_o = 113 \text{ мм}^{-1}$ , а  $R_{o/\phi} = 98 \text{ мм}^{-1}$ , но для объективов разных фокусных расстояний разрешающие способности должны быть разные.

Рассчитаем значения  $R_{o/\phi}$  для разрешающих способностей объективов, приведенных в таблице 1. Результаты представим в таблице 3.

**Таблица 3 – Разрешающая способность  $R_{o/\phi}$  системы «объектив – фотопленка»**

$f, \text{ мм}$	88	153	213	303
$R_{o/\phi}, \text{ мм}^{-1}$	59	112	146	164

Сопоставим полученные значения с данными таблицы 2. Для АФА с фокусными расстояниями  $f = 88$  и  $153 \text{ мм}$  получили значения, близкие к среднему, а для  $f = 303 \text{ мм}$  в таблице 3 значение  $R_{o/\phi}$  значительно больше, чем в таблице 2.

Попробуем другой путь. Для этого воспользуемся формулой [16]:

$$\frac{1}{R_{o/\phi}} = \frac{1}{R_o} + \frac{1}{R_{\phi}}. \quad (10)$$

При расчете по формуле (10)  $R_{o/\phi} = 144 \text{ мм}^{-1}$  при  $R'_o = 225 \text{ мм}^{-1}$  (отличная коррекция объектива) и  $R_{\phi} = 400 \text{ мм}^{-1}$ , а при  $R'_o = 113 \text{ мм}^{-1}$  (хорошая коррекция объектива) и  $R_{\phi} = 400 \text{ мм}^{-1}$  имеем  $R_{o/\phi} = 88 \text{ мм}^{-1}$ , что ближе к данным таблицы 2 и также подтверждает, что коррекции aberrаций не были отличными.

Рассчитаем значения  $R_{o/\phi}$  для разрешающих способностей объективов, приведенных в таблице 1. Результаты поместим в таблицу 4.

**Таблица 4 – Разрешающая способность  $R_{o/\phi}$  системы «объектив – фотопленка»**

$f, \text{ мм}$	88	153	213	303
$R_{o/\phi}, \text{ мм}^{-1}$	55	99	126	138

Расхождения между разрешающими способностями, полученными (табл. 3 и 4) при фокусных расстояниях 88 и 153 мм, незначительны и при расчете разрешающей способности  $R_{o/\phi}$  можно использовать как формулу (9), так и формулу (10).

При калибровке в паспорте АФА в случае, когда определяют разрешающую способность, указывают ее значение не только для каждой зоны, но и средневзвешенное значение  $R_{cp.взв.}$ .

Результаты калибровки аэрофотоаппаратов разных типов, которые были в нашем распоряжении, приведены в таблице 5

Таблица 5 – Результаты калибровки аэрофотоаппаратов разных типов

Тип АФА	Страна калибровки	$f$ , мм	№ объектива	$n_o$	$R_{cp.взв.}$ (на краю – в центре), мм <sup>-1</sup>
RC-20	Швейцария	213,377	7142	4	56 (30 – 102)
RC-30	США	153,209	1325	4	100 (80 – 134)
RC-30	США	153,240	13411	4	105 (80 – 134)
RC-30	США	152,47	–	4	97 (57 – 128)
RC-30	США	303,16	–	4	108 (85 – 118)
RC-30	США	302,97	–	4	105 (87 – 128)
RC-30	Швейцария	153,104	13212	4	–
ТЭ	Беларусь	201,220	5837	6	–
ТЭС	Беларусь	100,91	1003	6,3	–
ТЭС	Беларусь	99,173	3004	6,3	–

Для АФА с  $f = 88$  мм – нет данных. Как видим, при  $f = 153$  мм разрешающая способность выше, чем при  $f = 213$  мм, а при  $f = 303$  мм несколько выше, чем при  $f = 153$  мм. У аэрофотоаппаратов с большим фокусным расстоянием меньше разница между разрешающими способностями в центре поля зрения и на краю.

В литературе [8; 9] говорится, что разрешающая способность у АФА-ТЭ составляет 30 мм<sup>-1</sup> в центре и 18 мм<sup>-1</sup> на краю; у АФА-ТЭС – 30 мм<sup>-1</sup> в центре, 15 мм<sup>-1</sup> – на краю. Однако аэрофотоаппараты этих типов выпускались с разными фокусными расстояниями и, следовательно, разрешающие способности должны быть разными.

Сопоставим полученные значения разрешающих способностей в таблице 5 с данными таблицы 3.

При  $f = 153$  мм в таблице 3 получили результат, близкий к  $R_{cp.взв.}$

При  $f = 213$  мм и  $f = 303$  мм  $R_{cp.взв.}$  значительно ниже расчетного.

Как видим, для многих аэрофотоаппаратов нет данных определения разрешающей способности. Авторы работ [8; 15] отмечают, что калибровка предполагает определение элементов внутреннего ориентирования и дисторсии. То есть из всех аберраций в большинстве случаев определяют только дисторсию. Возможно, разрешающую способность при калибровке определяют только по желанию заказчика.

Однако, как свидетельствует вышесказанное, рассчитать разрешающую способность с требуемой точностью нельзя. Каждый объектив уникален и имеет свою разрешающую способность, а без данных о разрешающей способности снимка нельзя рассчитать разрешение при сканировании. Поэтому при калибровке необходимо обязательно определять разрешающую способность объектива  $R_o$  или системы «объектив – фотопленка»  $R_{o/\phi}$ .

Если в ходе калибровки определена разрешающая способность системы «объектив – фотопленка», то дальнейший расчет результирующей разрешающей способности не составит труда. В этом случае необходимо определить еще два входящих в формулу (3) коэффициента ФПМ, учитывающих влияние атмосферы и сдвига изображения.

Оптическая толщина атмосферы  $\tau$  равна сумме молекулярной толщины  $\tau_M$  и аэрозольной толщины  $\tau_a$ ;  $\tau = \tau_M + \tau_a$  [10]. В свою очередь, с достаточной для практики точностью и длиной волны  $\lambda = 0,555$  мкм  $\tau_M \approx 0,00879\lambda = 0,00488$ , а  $\tau_a \approx 1,2\alpha_{a,\lambda} = 0,298$ ,  $\tau = \tau_M + \tau_a = 0,302$  [10].

Аэрофотосъемку рекомендуют выполнять при высоте Солнца над горизонтом не ниже 20° [7].

Примем зенитное расстояние Солнца  $Z = 60^\circ$ . В этом случае число масс  $m_Z = 2$  [10], а оптическая толщина атмосферы может быть вычислена по формуле:

$$\tau_Z = \tau m_Z. \quad (11)$$

Оптическая толщина прямо пропорциональна приведенной высоте  $H_{II}$ , которая определяется в зависимости от фактической высоты полета  $H$  по формуле [10]:

$$H_{II} = 8,0(1 - \exp[-0,13H]), \quad (12)$$

и оптическая толщина атмосферы  $\tau_H$  для высоты полета  $H$  будет согласно [10] следующей:

$$\tau_H = \frac{\tau_z}{8,0} H_{II}. \quad (13)$$

Влияние атмосферы можно учесть с помощью коэффициента прозрачности атмосферы  $T(N)_a$ , который рассчитывается в зависимости от высоты съемки по формуле:

$$T(N)_a = \exp[-\tau_H]. \quad (14)$$

Разрешающая способность с учетом атмосферы  $R_{o/\phi/a}$  будет

$$R_{o/\phi/a} = R_{o/\phi} T(N)_a. \quad (15)$$

Значения приведенных высот  $H_{II}$  для разных фактических высот полета  $H$ , а также  $\tau_H$  и  $T(N)_a$  запишем в таблице 6.

**Таблица 6 – Значения приведенной высоты фотографирования  $H_{II}$  и коэффициентов прозрачности атмосферы  $T(N)_a$**

$H$ , км	0,3	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	5,0
$H_{II}$ , км	0,306	0,975	1,417	1,832	2,220	2,584	3,824
$\tau_H$	0,023	0,074	0,107	0,138	0,167	0,195	0,289
$T(N)_a$	0,98	0,93	0,90	0,87	0,85	0,82	0,75

На разрешающую способность системы «объектив – фотопленка – атмосфера» повлияет сдвиг изображения, возникающий из-за того, что камера во время экспонирования совершает совместно с летательным аппаратом линейное перемещение относительно снимаемой местности.

Учесть влияние сдвига можно с использованием выражения [8; 12]:

$$R_{o/\phi/a/cдв.} = \frac{R_{o/\phi/a}}{\sqrt{1 + (R_{o/\phi/a} \sigma_w)^2}}, \quad (16)$$

где сдвиг изображения  $\sigma_w$  можно вычислить по формуле [8; 9]:

$$\sigma_w = \frac{W}{m} t. \quad (17)$$

Здесь  $W$  – путевая скорость самолета;  $m$  – знаменатель масштаба фотографирования;  $t$  – выдержка.

Как видим, разрешающая способность будет постоянно меняться в зависимости от входящих в формулу (17) параметров. И для конкретного случая аэросъемки будет своя разрешающая способность снимков.

Рассчитаем результирующую разрешающую способность при съемке с разных высот полета  $H$ , выполненной при путевой скорости самолета  $W = 150$  км/ч (42 м/с), выдержке 1/300 с и разных масштабов фотографирования 1: $m$ , для АФА с  $f = 153$  мм, приняв  $R_{o/\phi} = 100$  мм<sup>-1</sup>. Результаты расчетов приведем в таблице 7.

**Таблица 7 – Значения результирующей разрешающей способности**

$H$ , м	300	1000	2000	3000
$m$	1960	6500	13000	19600
$T(N)_a$	0,98	0,93	0,87	0,82
$R_{o/\phi/a}$ , мм <sup>-1</sup>	98	93	87	82
$\sigma_w$ , мм	0,0709	0,0214	0,0107	0,071
$R_{o/\phi/a/cдв.}$ , мм <sup>-1</sup>	14	42	64	71

Как видно из таблицы 7, получили существенные различия в значениях разрешающей способности.

В случае если вместо пленочного АФА используется цифровой, последовательность расчета разрешающей способности точно такая же, как и у пленочного, но вместо пленки используется ПЗС-линейка или ПЗС-матрица, разрешающая способность которой может быть вычислена по следующей формуле [6; 8]:

$$R_{ПЗС} = 1/2l, \quad (18)$$

где  $l$  – размер пиксела на линейке или матрице ПЗС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов. – Минск: УП «БелНИЦЗЕМ», 2003. – 78 с.
2. Михеева, А.А. Анализ расчета элемента геометрического разрешения при сканировании снимков для обеспечения разрешающей способности графических фотопланов и снимков / А.А. Михеева // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 122–125.
3. Мышляев, В.А. Оценка точности цифровых ортофотопланов / В.А. Мышляев // Геодезия и картография. – 2005. – № 5. – С. 25–27.
4. Аэрофотоаппаратура и аэрофотографирование. Термины и определения: ГОСТ 23935-79. – Введен 01.01.1981. – М.: Госстандарт СССР.
5. Кононов, В.И. Основы методики расчета разрешающей способности и точности определения координат аэрофотографических систем / В.И. Кононов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geomatica.kiev.ua>.
6. Живичин, А.Н. Дешифрирование фотографических изображений / А.Н. Живичин, В.С. Соколов. – М.: Недра, 1980. – 253 с.
7. Аэрофотосъемочные работы. Справочник аэрофотосъемщика / А.А. Попов [и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 200 с.
8. Савиных, В.П. Аэрокосмическая фотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М.: «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 1997. – 378 с.
9. Лаврова, Н.П. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование / Н.П. Лаврова, А.Ф. Стеценко. – М.: Недра, 1981. – 296 с.
10. Кучко, А.С. Аэрофотография / А.С. Кучко. – М.: Недра, 1974. – 272 с.
11. Мальцев, М.Д. Прикладная оптика и оптические измерения / М.Д. Мальцев, Г.А. Каракулина. – М.: Машиностроение, 1968. – 472 с.
12. Стеценко, А.Ф. Учебное пособие по курсу «Аэрофотосъемка»: Проектирование аэрофотосъемочных работ / А.Ф. Стеценко. – М.: Изд-во МИИГАиК, 1995. – 48 с.
13. WILD RC-20. Aerifl camera system: проспект фирмы Leica [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [td-str.ru/file.aspx?id](http://td-str.ru/file.aspx?id).
14. Щербаков, Я.Е. Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов / Я.Е. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
15. Назаров, А.С. Фотограмметрия / А.С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.

Поступила 18.02.2015

#### CALCULATION OF CAMERA RECORD RESOLUTION ABILITY

**A. MIKHEEVA, V. YALTYKHAU**

*Camera record resolution ability plays an important role in photographic survey, especially in photo interpretation. Thus, it is necessary to know the resolution capacity of taken and future aero photos. The resolution ability is influenced by many factors: lens aberrations, photographic tape or CCD-receiver resolution, atmosphere and etc. The paper also reviews different of resolution ability pre-calculation. This calculation showcases that resolution ability can't be pre-calculated with enough accuracy as every camera lens is unique and has its own resolution ability. Therefore, during the aero camera calibration it is necessary to define not only distortion, but also the resolution ability of the system lens – phototape. Then there is no difficulty taking into account the impact of atmosphere, image shift and other factors.*

УДК 528.22.551.24

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ  
В ПОЛОЦКОМ РЕГИОНЕ***канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА; С.К. ТОВБАС; К.И. МАРКОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлен обзор инструментальных исследований современной геодинамики в Полоцком регионе, включающих геодезические, геофизические и сейсмологические наблюдения. Комплексная интерпретация результатов перечисленных исследований указала на современную тектоническую активность региона, что послужило основанием для организации здесь геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС».*

Полоцкий регион расположен на территории Полоцко-Курземского пояса тектонических разломов и характеризуется такими глубинными разломами, как Полоцкий и Чашникский, а также сеткой оперяющих их разрывных нарушений. В исследуемом регионе расположены Полоцкая ГЭС и магистральный трубопровод Полоцк – Унеча. Инструментальные геодинамические исследования здесь ведутся в рамках государственных программ научных исследований и хозяйственных работ с 2004 года и включают в себя комплекс геодезических (Полоцкий государственный университет – повторное нивелирование и спутниковые ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система) наблюдения); геофизических (Институт природопользования НАН Беларуси – магнитометрия и гравиметрия); сейсмологических (Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси) измерений.

По результатам геодезических наблюдений [1–5] получены следующие результаты:

- составлены пространственно-временные графики современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) и диаграммы изменения длин линий на период 2004–2013 годов на Полоцком геодинамическом профиле и выявлены места расположения разрывных нарушений;

- установлена закономерность, основанная на квазипериодическом характере поведения нивелирных реперов по линии профиля и описываемая тригонометрическим рядом Фурье;

- выполнен анализ результатов вычислительных экспериментов моделирования геодинамических процессов на Полоцком профиле по 10 циклам нивелирования, свидетельствующий о проявлении здесь многочисленных короткопериодических движений земной коры на фоне длиннопериодической (закономерной) составляющей этих движений;

- составлена модель прогноза поведения реперов на последующие годы.

**Геофизические исследования** в Полоцком регионе представлены георадарной съемкой, а также гравиметрическими и магнитометрическими наблюдениями. Опыт выполнения георадарной съемки на участке Полоцкого геодинамического профиля изложен в работе [6]. **Гравиметрические и магнитометрические наблюдения** в Полоцком регионе выполняются под руководством Г.И. Каратаева (Институт геохимии и геофизики, ныне Институт природопользования НАН Беларуси).

По согласованию с авторами исследований нами были использованы результаты 4-х циклов гравиметрических наблюдений на Полоцком профиле, а также гравиметрические и магнитометрические данные предпроектных геодинамических исследований в районе Полоцкой ГЭС, полученные в рамках ХД НИР № 6-1153/26552, Новополоцк, 2006.

Комплексная интерпретация имеющихся результатов геодезических и геофизических наблюдений на Полоцком профиле позволила получить положение разрывных нарушений, представленное в таблице, из которой следует, что данные различных исследований (нивелирование, гравиметрия и ГНСС наблюдения) в целом хорошо согласуются между собой.

Величины количественных характеристик деформаций земной коры в Полоцком регионе [1–5] говорят о его тектонической активности, что подтверждают и сейсмологические исследования Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси. Эти исследования свидетельствуют о существовании сейсмической опасности на площадке строительства Полоцкой ГЭС и на территории прохождения магистрального нефтепровода от возникновения местных небольших, а также сильных землетрясений других регионов.

На устойчивость данных инженерных сооружений, особенно трубопровода, могут неблагоприятно повлиять и ослабленные грунты тектонических разломов, где максимально проявляются деформации не только тектонического происхождения, но и вследствие действия сезонных и технологических факторов.

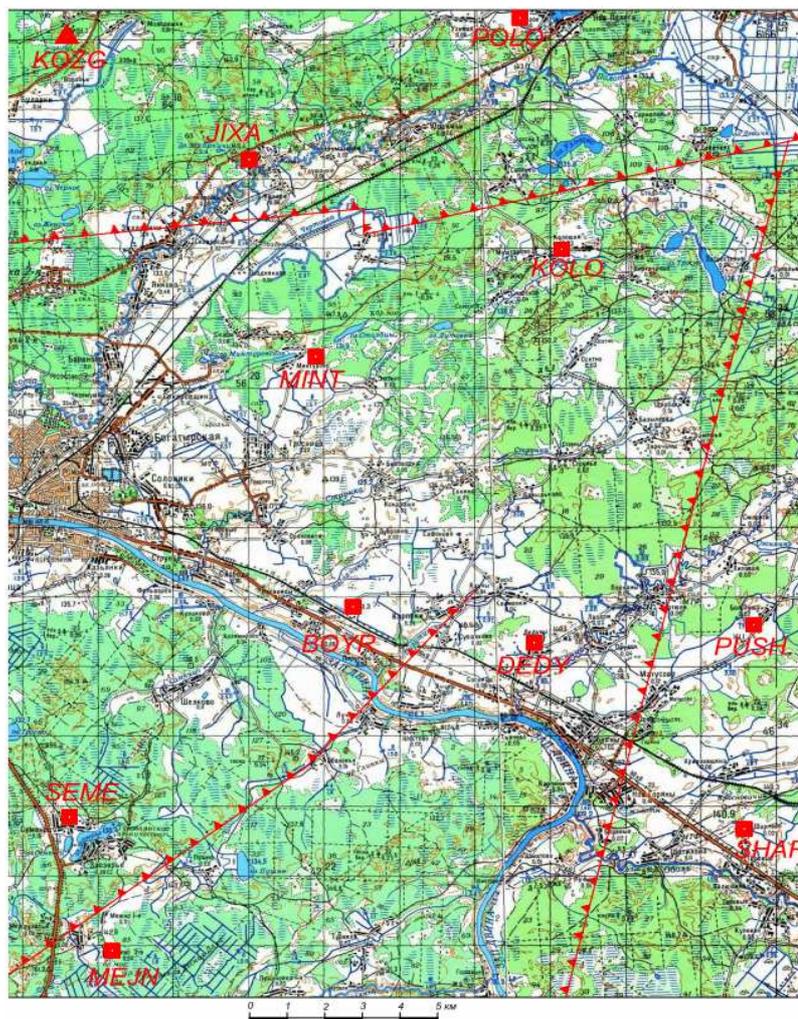
В связи с этим в 2014–2015 годах в рамках задания 5.4.15 Государственной программы научных исследований в Полоцком регионе создан геодинамический полигон (ГДП) «Полоцкая ГЭС» в виде спутниковой ГНСС сети, которая контролирует вызывающие опасения разломы: Чашникский, Полоцкий, Туровлянский (рисунок).

**Места расположения тектонических разломов на Полоцком профиле,  
установленные по данным различных инструментальных исследований**

Номера реперов, между которыми установлены разломы	Вид инструментальных исследований			
	нивелирование	гравиметрия	линейные ГНСС измерения $\Delta S$ мм	георадар (предположительно)
59...7130	+	+	++	
7130...8372	+	++	+	
8372...7701	++	++	+	
7701...7873	++	++	+	
7873...3895	-	+	+	+ <sup>*)</sup>
3895...6284	-	+	++(3895...6931)	
6284...6931	-	+	++	
6931...7100	++	++	-	
7100...3902	-	+	++	
3902...5960	++	++		

Знак «+» означает, что по данному виду инструментальных исследований разлом установлен.  
Двойным плюсом «++» выделены разломы, наиболее ярко выявляемые по конкретному виду инструментальных исследований.

\*) – георадарная съемка выполнялась на участке 7701...3895.



**Расположение тектонических разломов и пунктов ГДП «Полоцкая ГЭС»:**  
**DEDY, BOYR, SEME, MEJN – пункты, контролируемые Туровлянский разлом;**  
**POLO, KOLO, JIXA, MINT – Полоцкий; DEDY, KOLO, PUSH, SHAR – Чашникский**

**Заключение.** Основным практическим содержанием работ по созданию геодинамического полигона явилось следующее:

- проектирование полигона;
- изготовление и закладка центров;
- разработка методики ГНСС наблюдений;
- производство этих наблюдений на всех пунктах сети полигона.

Помимо спутниковых наблюдений в 2015 году нам удалось произвести высокоточное нивелирование на Полоцком геодинамическом профиле, дополняющем геодинамический полигон, что позволило продолжить начатую работу по моделированию проявления геодинамических процессов во времени и пространстве [4–5].

Таким образом, организацией геодинамического полигона «Полоцкая ГЭС» заложена основа для проведения долговременного геодинамического мониторинга в Полоцком регионе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Результаты инструментальных исследований 2004–2007 годов на Полоцком геодинамическом профиле / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2008. – № 3. – С. 57–61.
2. Шароглазова, Г.А. Результаты исследования деформаций земной коры методом высокоточных повторных спутниковых измерений в Полоцком регионе / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, К.И. Маркович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 16. – С. 96–101.
3. Шароглазова, Г.А. Исследование деформаций земной коры инструментальными методами в Полоцком регионе / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас // Тез. к докл. на 12 междунар. науч.-техн. геодез. конф. Минск, 1–2 июня 2014 г. – Минск: БНТУ, 2014.
4. Применение метода Христового к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 99–105.
5. Шароглазова, Г.А. Моделирование геодинамических процессов на участке Полоцко-Курземской зоны тектонических разломов по данным инструментальных исследований / Г.А. Шароглазова, В.Н. Коровкин, А.Н. Соловьев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 123–125.
6. Применение современного оборудования при исследовании деформаций земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб., 2009. – № 4(35). – С. 51–55.

*Поступила 02.12.2015*

#### TOOL RESEARCHES OF MODERN GEODYNAMICS IN THE POLOTSK REGION

**G. SHAROGLAZOVA, S. TOVBAS, K. MARKOVICH**

*Article is devoted to the review of the tool researches of modern geodynamics in the Polotsk region including geodetic, geophysical and seismological supervision. Complex interpretation of results of the listed researches indicated modern tectonic activity of the region that gave the grounds for the organization of the geodynamic ground “Polotsk Hydroelectric Power Station” here.*

УДК 528.22.551.24

**АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ ПОВТОРНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ  
НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

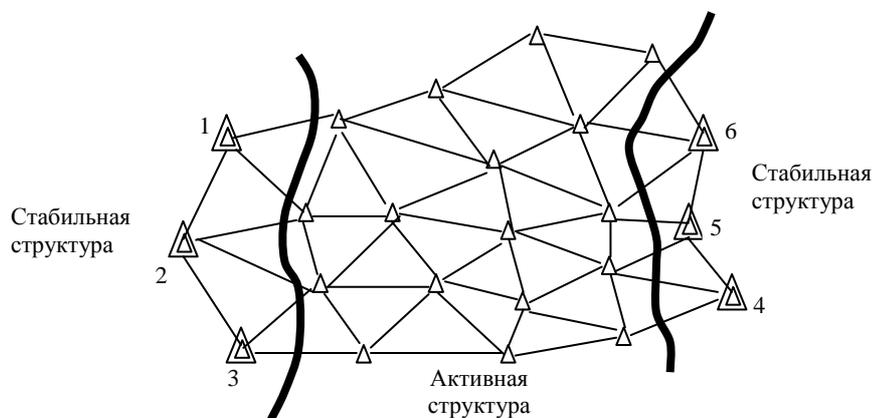
*канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА;  
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ; К.И. МАРКОВИЧ*

*Исследуется проблема ошибок исходных данных при определении характеристик деформаций земной коры, определяемых на геодинимических полигонах по разностям урвненных координат между эпохами измерений. Показано, что эта проблема не снимается и при переходе на спутниковые средства измерений. Широко используемый в настоящее время подход привязки пунктов локального геодинимического полигона к сети IGS с целью передачи от них координат на долговременные пункты локального полигона, которые в дальнейшем будут использоваться как исходные для определения координат рядовых пунктов этого полигона, дает далеко неоднозначные результаты и может резко снизить достоверность определения параметров деформаций.*

Известно, что при математической обработке повторных геодезических измерений с целью нахождения характеристик современных движений земной коры (СДЗК) существует проблема выбора исходных данных, так как эти характеристики должны определяться относительно стабильных структур. Особенно ощутимо это проявляется в параметрах горизонтальных СДЗК, определяемых по разностям урвненных координат между эпохами, так как фактическое изменение взаимного положения исходных пунктов будет влиять на искомые параметры по схеме влияния ошибок исходных данных.

При выполнении математической обработки наземных геодезических измерений в плановых сетях на геодинимических полигонах (ГДП) данный вопрос всесторонне исследовался, выработаны достаточно надежные способы ослабления влияния ошибок исходных данных [1–3]. Поясним суть проблемы и способы ее решения при обработке геодезических измерений в плановых сетях на ГДП.

Наличие проблемы ошибок исходных данных при определении характеристик горизонтальных деформаций земной коры всегда учитывалось уже на этапе проектирования плановых построений на ГДП. Проектировщикам рекомендовано, чтобы тектонически активный участок территории полигона приходился на среднюю часть сети, а ее крайние пункты хотя бы с двух сторон располагались на стабильных структурах земной коры (рис. 1). При проектировании, конечно же, стараются придерживаться этих рекомендаций, основываясь, как правило, на геолого-геофизических данных о строении земной коры в исследуемом районе. Выполняя урвнивание плановых сетей на ГДП логично в качестве исходных выбрать все пункты, расположенные на стабильных структурах (пункты 1, 2, 3, 4, 5, 6 на рисунке 1), считать их взаимное положение неизменным от эпохи к эпохе и урвнять сеть как несвободную. Однако на практике такой, казалось бы, очевидный подход к выбору исходных данных для урвнивания плановых сетей на ГДП не оправдал себя, так как данные геологии и геофизики не могут гарантировать неизменность от эпохи к эпохе взаимного положения исходных пунктов с необходимой для геодезии точностью.



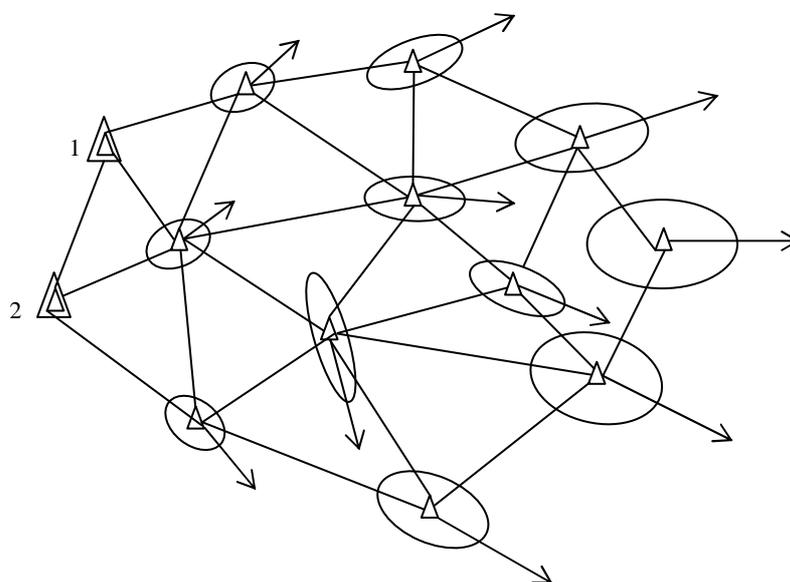
**Рисунок 1 – Схема плановой геодезической сети на геодинимическом полигоне и выбор исходных пунктов для ее урвнивания**

Каждый ошибочно выбранный в качестве исходного нестабильный пункт вносит искажения в конечный результат уравнивания по схеме влияния ошибок исходных данных. Чтобы уменьшить вероятность внесения в результаты уравнивания ошибок исходных данных, геодезисты пробовали уравнивать плановые сети на ГДП как свободные в традиционном понимании, то есть задавая минимально необходимый набор исходных данных:

- координаты  $X_{исх}$ ,  $Y_{исх}$  одного из пунктов сети;
- исходный дирекционный угол  $\alpha_{исх}$ ;
- длину исходной стороны  $S_{исх}$ .

При таком подходе вероятность искажения результатов уравнивания из-за фактического изменения во времени взаимного положения исходных пунктов несколько уменьшается, но недостаточно надежно.

Даже при полном отсутствии деформаций земной коры картина расположения векторов горизонтальных смещений центров пунктов на ГДП при уравнивании сети как свободной в традиционном смысле выглядит так, как показано на рисунке 2.



1, 2 – пункты, принятые при уравнивании за исходные;  
 (эллипс) – эллипс погрешностей и вектор горизонтальных смещений

Рисунок 2 – Схема расположения векторов горизонтальных смещений пунктов плановой сети на ГДП при уравнивании ее как свободной в традиционном смысле

Как следует из рисунка 2, векторы горизонтальных «смещений» наблюдаются, и их величины возрастают по мере удаления от исходных пунктов. Причина такого расположения векторов горизонтальных смещений, полученных по разностям уравненных координат между эпохами измерений, общеизвестна и заключается в факте влияния на результаты уравнивания случайных ошибок измерений и ошибок исходных данных. При этом случайные ошибки измерений вызывают искажения уравненных координат пунктов пропорционально  $\sqrt{L_i}$  ( $L_i$  – расстояние  $i$ -того пункта сети в километрах от исходных пунктов) и учитываются в оценке точности при уравнивании по всем используемым на производстве ЭВМ-программам. Таким образом, это влияние не так опасно. Иначе обстоит дело с ошибками исходных данных.

Опыт показал, что ошибки исходных данных при уравнивании плановых сетей на ГДП практически неизбежны и обусловлены двумя причинами:

- погрешностями задания ориентировки и масштаба сети;
- изменением во времени взаимного положения исходных пунктов (или длины исходной стороны и ее ориентировки) под влиянием тектонических факторов.

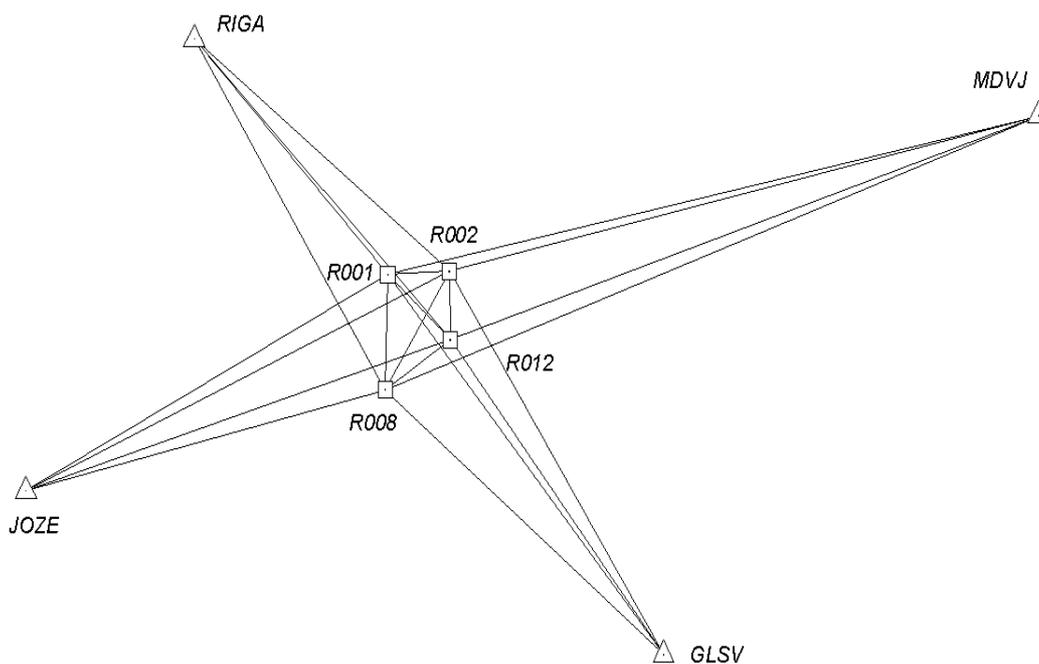
Ошибки исходных данных вызывают искажения уравненных координат пунктов пропорционально  $L_i$  ( $L_i$  – расстояние в километрах от исходных пунктов) и их трудно учесть в оценке точности при уравнивании, так как их величины чаще всего неизвестны по объективным причинам. Поэтому при анализе век-

торов горизонтальных смещений, полученных по разностям уравнированных координат между эпохами, эти искажения могут ошибочно интерпретироваться как деформации земной коры. Таким образом, влияние ошибок исходных данных крайне опасно.

Для ослабления влияния ошибок исходных данных на параметры горизонтальных деформаций, найденных из уравнивания плановых сетей на ГДП, измерения в которых выполнены наземными методами, рекомендовано [1; 2] использование теории уравнивания свободных геодезических сетей, или сетей с недостаточным числом исходных данных [4–7]. В этом случае необходимые для определения характеристик горизонтальных СДЗК разности уравнированных координат между сравниваемыми эпохами получают [3] из уравнивания сети в нефиксированной системе координат (без исходных пунктов) или в системе координат квазистабильных пунктов.

Использование спутниковых средств измерений на ГДП не снимает проблему ошибок исходных данных. Современные геодезисты при выполнении геодинамических исследований, особенно в районах атомных электростанций, пытаются решить ее путем привязки сети полигона к пунктам IGS (Международной Службы ГНСС). Для этого они организуют несколько долговременных пунктов на ГДП, выполняя на них длительные серии ГНСС наблюдений, затем уравнивают их совместно с результатами наблюдений на ближайших пунктах IGS сети, принимая полученные координаты на каждую эпоху за исходные при дальнейшей обработке результатов ГНСС наблюдений на оставшихся пунктах полигона.

Изложенный подход к выполнению математической обработки был исследован нами на реальном материале, геодинамической сети АЭС, состоящей из 17 пунктов с расстояниями между ними порядка 3...10 км. При этом 4 пункта из 17 были долговременными, на которых в обе сравниваемые эпохи измерений выполнялись непрерывные месячные серии ГНСС наблюдений двухчастотными спутниковыми приемниками с антеннами R7 и R8.



**Рисунок 3 – Схема привязки 4 долговременных пунктов ГДП АЭС (R001, R002, R008, R012) к пунктам IGS сети (RIGA, MDVJ – Менделеево; JOZE, GLSV – Киев)**

В соответствии с принятым подходом обработка выполнялась в 2 этапа:

1) данные ГНСС наблюдений 2012 и 2013 годов в представленной на рисунке 3 сети были обработаны в программе «Bernese» для длиннобазисных спутниковых сетей. В результате обработки получены координаты долговременных пунктов R001, R002, R008, R012 на дату 06.06.2012 и на дату 22.05.2013 в системе координат IGS, принятой для IGS сети, и годовые скорости их движений (табл. 1);

2) далее выполнялось уравнивание всей сети ГДП (17 пунктов) по программе «Trimble business centre», исходными данными для которой в каждую эпоху были взяты координаты пунктов, полученные на первом этапе уравнивания. Найденные в результате этого уравнивания разности координат между эпохами составили дециметр и более. Трансформирование координат, а также пересчет их в систему пло-

ских прямоугольных координат в проекции Гаусса – Крюгера несколько улучшило картину, но доверия к найденным параметрам деформаций земной коры не восстановило.

Для оценки качества спутниковых данных нами обработаны обе эпохи спутниковых наблюдений геодинимического полигона АЭС в программном комплексе «Trimble business centre» без привязки к IGS-пунктам относительно одного центрального пункта сети, принятого за стабильный.

**Таблица 1 – Результаты уравнивания сети, связывающей долговременные пункты ГДП с пунктами IGS**

Названия пунктов	Скорости изменения координат, мм/год, в системе координат IGB08	
	$V_x$	$V_y$
R001	-8,5	9,9
R002	-32,7	5,6
R008	13,5	27,8
R012	-34,3	1,6

На наш взгляд, такой подход при отсутствии программного обеспечения с алгоритмом, реализующим рекомендованную в [1–3] методику обработки для повторных спутниковых наблюдений, максимально приблизил к уравниванию без исходных пунктов, так как решение в нефиксированной системе координат получается относительно центра заданных координат пунктов сети.

Результаты обработки приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Разности координат между эпохами 2013-12 для пунктов сети ГДП АЭС, полученные по «Trimble business center»**

Названия пунктов	Разность координат (2013–2012)	
	$dx$ (мм)	$dy$ (мм)
тур1	-3,7	-1,0
4329	-0,9	0,4
тур6	1,6	1,1
тур9	0,0	0,0
<u>R001</u>	-0,6	-5,5
<u>R002</u>	1,0	-0,7
R003	4,7	1,1
R004	1,6	2,0
R005	-1,2	4,7
R006	0,3	0,7
R007	0,0	-2,3
<u>R008</u>	-1,2	0,5
R009	-2,1	1,6
R010	1,9	-0,7
R011	-1,5	-1,8
<u>R012</u>	0,3	-2,7
R013	0,0	22,9

Приведенные в таблице 2 разности для плановых координат сопоставимы с результатами, которые мы получаем для аналогичных длин линий на геодинимических построениях Полоцкого региона [8].

**Заключение.** Анализ полученных данных показал, что широко используемый в настоящее время подход привязки пунктов локального ГДП к сети IGS с целью передачи от них координат на долговременные пункты локального полигона, которые в дальнейшем будут использоваться как исходные для определения координат рядовых пунктов этого полигона, дает далеко неоднозначные результаты. В на-

шем случае этот подход резко снизил достоверность определения параметров деформаций и привел к появлению большого числа вопросов как теоретического, так и практического плана. Совершенно ясно, что такой подход может быть использован только при четко отлаженной методике спутниковых измерений и обработке, отточенной под используемое программное обеспечение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко, М.Д. Определение горизонтальной составляющей СДЗК способом уравнивания разностей измерений без «твердых» пунктов на примере Толбачинского геодинамического полигона (Камчатка) / М.Д. Герасименко, А.П. Кириенко, Г.А. Шароглазова // Тихоокеаническая геология. – 1983. – № 4. – С. 106–110.
2. Герасименко, М.Д. Определение современных движений земной коры из повторных измерений / М.Д. Герасименко, Г.А. Шароглазова // Геодезия и картография. – 1985. – № 7. – С. 25–29.
3. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике: учеб. пособие для вузов / Г.А. Шароглазова. – Новополоцк: ПГУ, 2002.
4. Ashkenazi, V. Criteria for optimization a practical assessment of a free network adjustment / V. Ashkenazi // *Bullettino di geodesia e scienze affini*. – 1974. – № 1(33). – P. 77–91.
5. Brunner, F.K. A comparison of computation methods for crustal strains from geodetic measurements / F.K. Brunner, R. Coleman and Hirsch // *Tectonophysics*. – 1981. – V. 71, № 1–4, January 10. – P. 281–298.
6. Koch, K.R. Multivariate hypothesis tests for detecting Recent crustal movements / K.R. Koch and D. Fritsch // *Tectonophysics*. – 1981. – V. 71, № 1–4, January 10. – P. 301–313.
7. Mittermayer, E. A generalisation of the Least – Squares Method for the Adjustment of free Networks / E. Mittermayer // *Bull. Geod.* – 1972. – № 104. – P. 139–157.
8. Шароглазова, Г.А. Результаты исследования деформаций земной коры методом высокоточных повторных спутниковых измерений в Полоцком регионе / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, К.И. Маркович // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2014. – № 16. – С. 96–100.

*Поступила 01.12.2015*

#### **THE ANALYSIS OF A TECHNIQUE OF PROCESSING OF REPEATED GNSS OF OBSERVATIONS ON GEODYNAMIC GROUNDS OF THE NPP**

**G. SHAROGLAZOVA, V. YALTYKHOV, K. MARKOVICH**

*Article is devoted to a problem of errors of basic data when determining characteristics of the deformations of earth crust determined on geodynamic polygons by differences of the adjusted coordinates between eras of measurements. It is shown that this problem is not removed upon transition to satellite measuring instruments. Approach of a binding widely now in use of points of local GDP to the IGS network for the purpose of transfer of coordinates from them on long-term points of the local polygon which will be used further as initial for determination of coordinates of ordinary points of this ground yields far ambiguous results and can sharply reduce reliability of determination of parameters of deformations.*

УДК 528.22.551.24

**ДЕТАЛИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ПО ДАННЫМ ПОВТОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

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

*Показан комплексный подход различных наук о Земле при организации геодинамических исследований методом повторных геодезических измерений. Грамотная закладка центров геодезических реперов с учетом геолого-геофизических и сейсмологических данных, принятая методика производства геодезических измерений и их математической обработки позволили выполнить детализацию расположения тектонических разломов в Полоцком регионе по геодезическим данным, а также дать оценку современной тектонической активности Полоцкого глубинного разлома.*

В последнее десятилетие исследователи новейшей тектоники [1; 2] указывают, что тектонические разломы играют все более важную роль в жизни человека. С ними связаны не только землетрясения, полезные ископаемые и аварии на трубопроводах, но и выделение радиоактивных элементов, вредные для здоровья геофизические аномалии, повышенная концентрация радона, вызывающие увеличение числа раковых заболеваний и неблагоприятные изменения окружающей среды.

Для определения расположения разлома и оценки его активности используют комплекс геолого-геоморфологических, геофизических, сейсмологических и геодезических методов. Так, геологи для поиска тектонических разломов широко применяют аэро- и космофотоснимки [3]; геоморфологи устанавливают места их расположения из анализа возраста горных пород и нарушений сплошности слоя по соответствию определенному геологическому времени; геофизики – по аномалиям геофизических полей (гравитационных и магнитных); сейсмологи – по концентрации очагов землетрясений. Примером последнего может служить **Полоцко-Курземский пояс тектонических разломов**, выделенный сравнительно недавно в теле Восточно-Европейской платформы группой геологов и геофизиков НАН Беларуси [4–7] по гравитационным, магнитным аномалиям и сейсмологическим данным.

Определенную нишу при исследовании тектоники занимают и геодезисты, которые могут 1) детализировать положение разрывных нарушений, оперяющих основной разлом, а также 2) оценить их современную активность с высокой степенью достоверности. Традиционно второе из двух сформулированных приложений геодезии к геодинамике является приоритетным, так как геодезисты могут профессионально организовать мониторинговый контроль над активностью тектонического разлома, заложив надежные центры по разные его стороны, выполнив на них измерения, и получить количественные характеристики движений на исследуемом разломе.

Организация геодинамического полигона (ГДП) с целью определения количественных характеристик деформаций земной коры геодезическими методами – трудоемкий и дорогостоящий процесс. Поэтому геодезисты при закладке своих контрольных реперов на ГДП обращают внимание не только на надежную конструкцию центров этих реперов, но и на максимально возможную оптимальность их расположения по отношению к известным тектоническим разломам, установленным по имеющимся данным других наук о Земле: геологии, геофизики, сейсмологии.

Примером такого подхода может служить **организация ГДП «Полоцкая ГЭС»**, закладка центров реперов на котором была реализована с учетом данных геофизических, сейсмологических и геологических исследований, выполняемых в рамках Государственных программ научных исследований (ГПНИ) и хозяйственных договоров Полоцким государственным университетом, Научно-производственным центром по геологии (НПЦ) по геологии и Институтом природопользования НАН Беларуси [8]. Так, в частности, оптимальность расположения центров геодезических реперов контролировалась специалистами НПЦ по геологии с помощью космических снимков Landsat 5ТМ масштабов 1:100000, 1:500000 и 1:1000000, а также комплекта материалов аэрофотосъемки различных масштабов и лет залета, необходимых для расшифровки и уточнения спутниковых данных. Работа выполнялась под руководством ведущего геолога А.А. Святогорова, в результате которой была составлена карта структурного дешифрирования, выполнена интерпретация геолого-геофизических данных территории ГДП «Полоцкая ГЭС», что позволило геодезистам надежно установить места закладки центров реперов.

В дальнейшем, в процессе выполнения геодинамических исследований методом повторных геодезических измерений при условии достаточной плотности заложенных реперов появляется возможность детализации расположения разрывных нарушений, оперяющих основной разлом, установления новых, а также оценки их современной активности с высокой степенью достоверности.

Указанная работа по детализации расположения тектонических нарушений выполнена на Полоцком геодинамическом профиле, пересекающем в меридиональном направлении Полоцкий глубинный разлом, в зоне влияния которого расположен нефтепровод и Полоцкая ГЭС. Повторные геодезические измерения в виде высокоточного нивелирования и спутниковых ГНСС (Глобальная навигационная спутниковая сеть) наблюдений здесь выполнялись ежегодно с 2004 года [8–10]. Точность нивелирования характеризуется ошибкой не хуже 0,3 мм/км, а разности наклонных дальностей, определенные по результатам ГНСС наблюдений, характеризуются точностью  $\pm 1,55$  мм.

**Заключение.** По результатам проведенных геодезических исследований определено не только детальное положение тектонических нарушений, являющихся границами 5 тектонических блоков размерами от 1,5 до 3 км, но и выявлен сложный характер деформаций земной коры на этих блоках. Так, блок 1 испытывает поднятие с растяжением, на блоке 2 сжатие сопровождается опусканием, а спокойный подъем на блоке 3 идет параллельно с дифференцированными горизонтальными деформациями (сильное сжатие сменяется значительным растяжением, переходящим снова в сжатие), на опускающемся блоке 4 значимых горизонтальных деформаций не наблюдается, на пятом – подъем сопровождается растяжением. Таким образом, можно сделать вывод о современной активности Полоцкого глубинного разлома.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трифионов, В.Г. Динамика Земли и развитие общества / В.Г. Трифионов, А.С. Карханян. – М.: ОГИ, 2008. – 434 с.
2. Скрипкин, С.Н. Новый метод автоматической интерпретации структурно-тектонических нарушений на основе результатов трехмерной сейсморазведки / С.Н. Скрипкин // Вопросы современной науки и практики. – М.: Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 3.
3. Губин, В.Н. Космогеологическая модель новейшего поля напряжений земной коры Беларуси / В.Н. Губин. – Минск, 2010.
4. Полоцко-Курземский пояс разломов / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 6. – С. 85–89.
5. Геолого-геофизическая характеристика Полоцко-Курземского пояса разломов / Р.Г. Гарецкий // Літасфера. – 2004. – № 2. – С. 10–17.
6. Карабанов, А.К. Неотектоника Беларуси: дис. ... д-ра геолого-минералог. наук / А.К. Карабанов. – Минск, 2002.
7. Общее сейсмическое районирование Белорусско-Прибалтийского региона / Р.Г. Гарецкий [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 4. – С. 98–102.
8. Результаты инструментальных исследований 2004–2007 годов на Полоцком геодинамическом профиле Г.А. Шароглазова [и др.] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – СПб. – 2008. – № 3. – С. 57–61.
9. Шароглазова, Г.А. Результаты исследования деформаций земной коры методом высокоточных повторных спутниковых измерений в Полоцком регионе / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас, К.И. Маркович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 16. – С. 96–100.
10. Шароглазова Г.А. Исследование деформаций земной коры инструментальными методами в Полоцком регионе / Г.А. Шароглазова, С.К. Товбас // Тез. к докл. на 12 междунар. науч.-техн. геодез. конф., Минск, 1–2 июня 2014 г. – Минск: БНТУ.

Поступила 03.12.2015

#### **SPECIFICATION OF AN ARRANGEMENT OF TECTONIC EXPLOSIVE VIOLATIONS ACCORDING TO REPEATED GEODETIC MEASUREMENTS**

**G. SHAROGLAZOVA**

*In work the integrated approach of various sciences about Earth at the organization of geodynamic researches is shown by method of repeated geodetic measurements. Competent laying of the centers of geodetic reference points taking into account geologic-geophysical and seismological data, the accepted technique of production of geodetic measurements and their mathematical processing allowed to execute specification of an arrangement of tectonic breaks in the Polotsk region according to geodetic data, and also to give an assessment to modern tectonic activity of the Polotsk deep break.*

УДК 528.63

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТРАНСФОРМАЦИИ НА ПЛОСКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

*канд. техн. наук, доц. А.М. ДЕГТЯРЁВ; А.С. ИВАШНЁВА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Анализируется возникающая достаточно часто в геодезии задача трансформации координат. В большинстве практических случаев задача такого рода решается при вставке части сети в сеть с другой системой координат, при получении элементов деформации различных объектов, при включении главных осей объектов в государственную систему, при фотограмметрических работах и т.д. Показано несколько путей для решения задачи трансформации. Ход решения и вычислительные результаты представлены по трем методам преобразования координат.*

Связь между двумя системами координат может быть установлена, если известен закон преобразования (трансформации) одной системы в другую или если координаты двух (или более) точек известны в обеих системах. Из основных задач трансформации выделяют задачу собственно преобразования и задачу поиска оптимальных, в каком-либо смысле, деформационных характеристик.

**Обычная задача трансформации** формулируется следующим образом. Есть координаты  $(x, y)$  для  $n$  точек в старой системе  $K_C$  и есть координаты  $(X, Y)$  для этих же точек в новой системе  $K_H$ . Необходимо найти оптимальную функцию  $f$  перехода от старой системы координат к новой

$$(X, Y) = f(x, y), \quad (1)$$

или

$$K_H = f(K_C). \quad (1a)$$

Так как подавляющее число преобразований для геодезических задач включает только вращение, сдвиг и масштабирование одной системы относительно другой, то в качестве вида функции  $f$  преобразования для (1a) достаточно использовать линейную функцию с матрицей  $A$  и вектором  $b$  вида

$$K_H = A \cdot K_C + b, \quad (2)$$

которая описывает самый общий, аффинный (6-параметровой) метод преобразования.

Так как для контроля и оценки точности берется избыточное число точек, то переопределенная система (2) решается под условием метода наименьших квадратов (МНК) с получением элементов преобразования в виде матрицы  $A$  и вектора  $b$ .

Запишем систему (2) в развернутом виде для одной  $i$ -той точки как

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \\ d \cdot x_i + e \cdot y_i + f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $X_i, Y_i, x_i, y_i$  – координаты в новой и старой системе соответственно;  $a, b, c, d, e, f$  – коэффициенты линейного аффинного преобразования на плоскости.

При аффинной модели трансформации производится сдвиг по осям на величины  $t_x$  и  $t_y$ , масштаб изменяется на величины  $m_x$  и  $m_y$ , также выполняется поворот для точек относительно одной оси на угол  $\varphi_1$ , а другой – на угол  $\varphi_2 = \varphi_1 + \varepsilon$ , то есть с нарушением ортогональности исходной системы координат.

Наиболее часто в качестве реализации алгоритма аффинной трансформации используют так называемый «метод растягивания». В нем все неизвестные вытягиваются в вектор и решение производится на основе метода наименьших квадратов. Решение на основе данного подхода описано во многих источниках (см., например [1]).

Задача трансформации может трактоваться как двумерная регрессия с двумерным откликом [2]. Решение двумерной регрессии с двумерным откликом может быть реализовано на основе псевдонезависимой регрессии и на основе теоремы о характеристиках многомерного условного закона распределения. Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки.

Рассмотрим эти подходы более подробно. В статье [3] предложена процедура оптимального решения на основе МНК задачи многомерной регрессии с многомерным откликом. Для целей трансформации

это будет двумерная регрессия с двумерным откликом [4; 5]. Для этого целесообразно систему (3) для шести параметров аффинного преобразования представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ \dots & \dots \\ X_n & Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \\ c & f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

добавив вектор сдвига в матрицу преобразования.

Эта система хорошо решается на основе общего алгоритма метода наименьших квадратов с получением матрицы общего аффинного преобразования:

$$k = \begin{bmatrix} a & d \\ b & e \\ c & f \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для этого составляется матрица плана для преобразования  $A$ , вектор свободных членов преобразования  $l$ , нормальная матрица для системы нормальных уравнений  $N$  и вектор свободных членов системы нормальных уравнений  $b$  вида

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \\ l = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ \dots & \dots \\ X_n & Y_n \end{bmatrix}, \\ N = A^T \cdot A, \\ b = A^T \cdot l. \end{array} \right. \quad (6)$$

Решение данной системы  $\hat{k} = N^{-1} \cdot b$  дает искомую матрицу преобразования координат, состоящую из матрицы трансформации  $T = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix}$  и вектора сдвига  $s = \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix}$ . Необходимо учитывать, что матрица  $T$  получается в виде транспонированной.

Оценка точности производится по обычной схеме метода наименьших квадратов. Вначале получают матрицу поправок  $V$  как разность между новой уравненной системой координат и новой измеренной системой  $K_n$ :

$$V = \hat{k} \cdot K_c - K_n. \quad (7)$$

Значение целевой функции  $\Phi = v^T v$  для оценки точности можно получить и как

$$v^T v = Tr_r(V \cdot V^T), \quad (8)$$

где  $Tr(*)$  – след матрицы.

Теперь можно получить общую погрешность модели в виде стандартного отклонения

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T v}{2n-6}} S, \quad (9)$$

где  $n$  – число точек;  $b$  – число оцениваемых коэффициентов.

При аффинном преобразовании погрешности коэффициентов построчно равны между собой, и для оценки точности можно использовать стандартную формулу МНК для ковариационной матрицы  $K_k$

$$K_k = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q. \quad (10)$$

Тогда корень из диагональных элементов ковариационной матрицы  $K_k$  будет тройкой стандартных отклонений для соответствующей пары коэффициентов преобразования:

$$\hat{\sigma}_a = \hat{\sigma}_d = \sqrt{(K_k)_{11}} = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{11}}; \quad (11)$$

$$\hat{\sigma}_b = \hat{\sigma}_e = \sqrt{(K_k)_{22}} = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{22}};$$

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma}_f = \sqrt{(K_k)_{33}} = \hat{\sigma}_0 \cdot \sqrt{Q_{33}}.$$

При решении задачи трансформации на основе условного математического ожидания с двумерным откликом используют теорему о характеристиках многомерного условного нормального закона распределения (см., например, [6]). Оценки, полученные на основе условных характеристик закона распределения, носят название байесовских оценок. Для решения задачи создается объединенная матрица плана  $K$  из старых  $K_c = (x, y)$  и новых  $K_n = (X, Y)$  координат по столбцам для  $n$  точек, из которой переходят к выборочной ковариационной матрице, вычисляемой на основе деления на блоки:

$$S = \frac{1}{n} C^T \cdot C = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} C_c^T C_c & C_c^T C_n \\ C_n^T C_c & C_n^T C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{cc} & S_{cn} \\ S_{nc} & S_{nn} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $C_c$  и  $C_n$  – соответственно центрированные средними старая и новая системы координат.

Теперь на основе матрицы  $S$  с использованием теоремы о многомерном условном распределении вероятностей имеем:

- для условного математического ожидания

$$MO(K_n / K_c) = \hat{K}_n = \bar{K}_n + S_{nc} \cdot S_{cc}^{-1} (K_c - \bar{K}_c) = \bar{K}_n + \hat{X} (K_c - \bar{K}_c), \quad (13)$$

- в нормальном виде

$$\hat{K}_n = \hat{X} \cdot K_c + (\bar{K}_n - \hat{X} \cdot \bar{K}_c) = \hat{X} \cdot K_c + D \quad (14)$$

с матрицей коэффициентов  $\hat{X}$ , которая равна матрице трансформации  $T$ , и вектором свободных членов  $D$ , равным вектору сдвига  $s$ :

$$\begin{aligned} \hat{X} &= S_{nc} \cdot S_{cc}^{-1}, \\ D &= \bar{K}_n - \hat{X} \cdot \bar{K}_c, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\bar{K}_n, \bar{K}_c$  – векторы средних значений по координатам старой и новой систем.

Для оценки точности модели при определении коэффициентов преобразования на основе байесовского подхода используем формулу условной ковариационной матрицы

$$\tilde{N}_{K_n|K_c} = S_{nn} - S_{nc} \cdot S_{cc}^{-1} \cdot S_{cn}. \quad (16)$$

След этой матрицы будет в точности равен значению целевой функции  $\Phi$ .

Стандартное отклонение модели рассчитывается по формуле (9).

Для примера рассмотрим преобразование пяти точек, расположенных произвольно (рисунок).

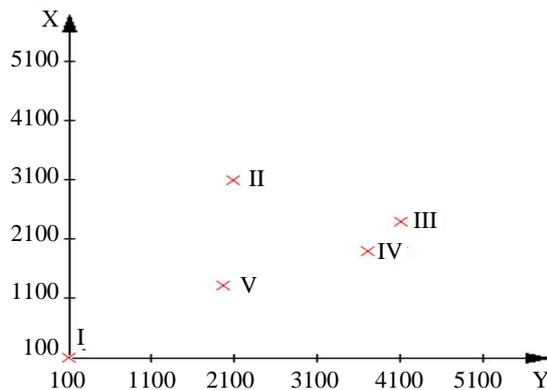


Схема расположения точек

**Решение методом растягивания**

Образует совместную систему из 10 уравнений:

$$\begin{bmatrix} 122.254 \\ 285.735 \\ 1606.093 \\ 4701.791 \\ -859.413 \\ -6737.841 \\ -1363.858 \\ 5754.800 \\ -101.206 \\ 3370.349 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{x1} \\ v_{y1} \\ v_{x2} \\ v_{y2} \\ v_{x3} \\ v_{y3} \\ v_{x4} \\ v_{y4} \\ v_{x5} \\ v_{y5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 99.932 & 99.990 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 99.932 & 99.990 & 0 & 1 \\ 3100.152 & 2099.994 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3100.152 & 2099.994 & 0 & 1 \\ 2300.037 & 4100.074 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2300.037 & 4100.074 & 0 & 1 \\ 1499.997 & 3700.070 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1499.997 & 3700.070 & 0 & 1 \\ 1300.036 & 1900.071 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1300.036 & 1900.071 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ d \\ e \\ c \\ f \end{bmatrix}.$$

Решение системы – коэффициенты преобразования

$$k = \begin{bmatrix} 1.039159 \\ -0.816950 \\ 0.599934 \\ 1.258032 \\ 100.113 \\ 200.026 \end{bmatrix}$$

Из полученного вектора можно выделить матрицу трансформации

$$T = \begin{bmatrix} 1.039159 & -0.816950 \\ 0.599934 & 1.258032 \end{bmatrix}$$

и вектор сдвига

$$s = \begin{bmatrix} 100.113 \\ 200.026 \end{bmatrix}.$$

Апостериорная погрешность единицы веса

$$\hat{\sigma}_o = 0.07824.$$

Стандартные отклонения для соответствующей пары коэффициентов:

$$\hat{\sigma}_a = \hat{\sigma}_d = 0.000000938;$$

$$\hat{\sigma}_b = \hat{\sigma}_e = 0.000000661;$$

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma}_f = 0.00161753.$$

**Решение по алгоритму регрессии с двумерным откликом**

Составляется матрица плана для преобразования  $A$ , вектор свободных членов преобразования  $l$

$$A = \begin{bmatrix} 99.932 & 99.990 & 1 \\ 3100.152 & 2099.994 & 1 \\ 2300.036 & 4100.074 & 1 \\ 1499.997 & 3700.070 & 1 \\ 1300.036 & 1900.071 & 1 \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} 122.250 & 385.735 \\ 1606.093 & 4701.791 \\ -859.416 & 6737.841 \\ -1363.858 & 5754.800 \\ -101.206 & 3370.350 \end{bmatrix}.$$

Решение системы на основе формул (7) дает матрицу преобразования  $k$ :

$$k = \begin{bmatrix} 1.039159 & 0.599934 \\ -0.816950 & 1.258032 \\ 100.113 & 200.026 \end{bmatrix}.$$

Из полученной матрицы можно выделить матрицу трансформации

$$T = \begin{bmatrix} 1.039159 & -0.816950 \\ 0.599934 & 1.258032 \end{bmatrix}$$

и вектор сдвига

$$s = \begin{bmatrix} 100.113 \\ 200.026 \end{bmatrix}.$$

Апостериорная погрешность единицы веса  $\hat{\sigma}_0 = 0.07824$ .

Стандартные отклонения для соответствующей пары коэффициентов:

$$\hat{\sigma}_a = \hat{\sigma}_d = 0.000000938;$$

$$\hat{\sigma}_b = \hat{\sigma}_e = 0.000000661;$$

$$\hat{\sigma}_c = \hat{\sigma}_f = 0.00161753.$$

**Решение на основе теоремы о характеристиках многомерного условного закона распределения**  
Создаем объединенную матрицу плана  $K$ :

$$K = \begin{bmatrix} 99.932 & 99.990 & 122.254 & 385.735 \\ 3100.152 & 2099.994 & 1606.093 & 4701.791 \\ 2300.036 & 4100.074 & -859.412 & 6737.841 \\ 1499.997 & 3700.070 & -1363.858 & 5754.800 \\ 1300.036 & 1900.071 & -101.206 & 3370.349 \end{bmatrix}.$$

Решением является матрица коэффициентов  $\hat{X}$ , она же – матрица трансформации  $T$ , и вектор свободных членов  $D$ , он же – вектор сдвига  $s$ :

$$T = \begin{bmatrix} 1.039159 & -0.816950 \\ 0.599934 & 1.258032 \end{bmatrix}$$

$$s = \begin{bmatrix} 100.113 \\ 200.026 \end{bmatrix}$$

Апостериорная погрешность единицы веса

$$\hat{\sigma}_0 = 0.07824.$$

**Заключение.** По результатам вычислений видим, что все три метода дают одинаковые коэффициенты преобразования и одинаковую оценку точности. Однако более простой реализацией алгоритма обладают второй и третий методы преобразования, которые получены в результате трактовки задачи трансформации как двумерная регрессия с двумерным откликом. Также, в отличие от первого метода трансформации, во втором и третьем подходах на каждом шаге решения виден смысл производимых действий, позволяющих более оптимально строить вычисления и проводить анализ. Немаловажным является

тот факт, что сводимость плоского аффинного преобразования к двумерной регрессии с двумерным откликом позволяет использовать все возможности, которые присущи регрессионному анализу, например, детерминация, робастность, ортогональная регрессия. Это, в свою очередь, дает возможность получать более качественные и адекватные результаты обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ghilani, Charles D. Adjustment computations: spatial data analysis / Charles D. Ghilani, Paul R. Wolf. – Hoboken: JOHN WILEY & SONS, INC., 2006. – 632 с.
2. Дегтярев, А.М. Идентификация модели трансформации в геодезии на основе аффинного преобразования / А.М. Дегтярев, В.В. Ялтыхов // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 71–74.
3. Zellner, A.S. An Efficient Method of Estimating Seemingly Unrelated Regressions and Tests for Aggregation Bias Author(s) / A.S. Zellner // Journal of the American Statistical Association. – Vol. 57, № 298 (Jun., 1962). – С. 348–368.
4. Демиденко, Е.З. Линейная и нелинейная регрессии / Е.З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
5. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер, В.П. Носко; под ред. М.Б. Малютова. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
6. Андерсон, Т. Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. – М.: Физматлит, 1963. – 500 с.

Поступила 02.11.2015

#### TASK SOLUTION OF TRANSFORMATION ON THE PLANE USING MULTIVARIATE DISTRIBUTION

A. DEGTYARYOV, A. IVASHNIOVA

*The task of transforming the coordinates in geodesy occurs often enough. In most practical cases the problem of this kind is solved when the network part is inserted into the network with a different system of coordinates; when producing of deformation elements of various objects; when the main axes of the objects included in the public system; in photogrammetric work, etc. There are several ways to solve the problem of transformation. The process of the solution and computational results are presented for three methods of coordinate transformation.*

УДК 528.48

## ВАРИАЦИИ ФАЗОВЫХ ЦЕНТРОВ РАЗЛИЧНЫХ GPS-АНТЕНН АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБСОЛЮТНЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК АНТЕНН

канд. техн. наук, доц. **В.В. ЯЛТЫХОВ**; **К.И. МАРКОВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ пространственного изменения положений фазовых центров различных GPS-антенн в зависимости от направления сигнала от спутника. Определены зависимости изменений азимутальных и высотных составляющих вариаций фазовых центров антенн. Даны рекомендации по использованию соответствующих типов калибровок вариаций фазовых центров.*

Как известно, точка, положение которой может быть определено при спутниковых измерениях, является фазовым центром (PCV – Phase Center Variations) GPS-антенны. Однако реальная антенна не имеет четко определенного фазового центра. Вместо этого положение фазового центра есть функция от направлений на спутники, от которых антенна принимает сигнал. В силу того, что направления на спутники непрерывно изменяются, фазовый центр антенны будет определен как среднее из всевозможных положений фазового центра в период измерения. Это среднее место фазового центра является средневзвешенным всех отдельных фазовых центров по каждому из измерений. При расчете коротких базовых линий эти изменения не имеют значительного влияния и на каждом конце линии практически равны. Однако различные типы антенн все же имеют различные вариации фазы и различную чувствительность к углу отсечки спутников и геометрии спутникового созвездия, что необходимо учитывать.

Практика применения любых типов GPS-антенн показывает необходимость знания вариаций фазовых центров для достижения миллиметровой точности при спутниковых измерениях базовых линий. На сегодняшний день существует два типа калибровок антенн по учету вариаций фазовых центров: абсолютные калибровки и относительные.

Основным недостатком относительных калибровок является то, что поправки зависят от опорной антенны и оценка PCV при низких отметках невозможна из-за появления гораздо большего шума и сильной многолучевости сигнала в данных наблюдений. Кроме того, спутниковое созвездие в месте калибровки не может покрыть равномерно все полушарие антенны, что приводит к появлению «полярной дыры». Существующая процедура NGS калибровки антенн использует полевые измерения для определения относительного фазового центра и PCV по отношению к эталонной антенне. Схема тестового полигона для проведения относительных NGS калибровок представлена на рисунке 1 [1].

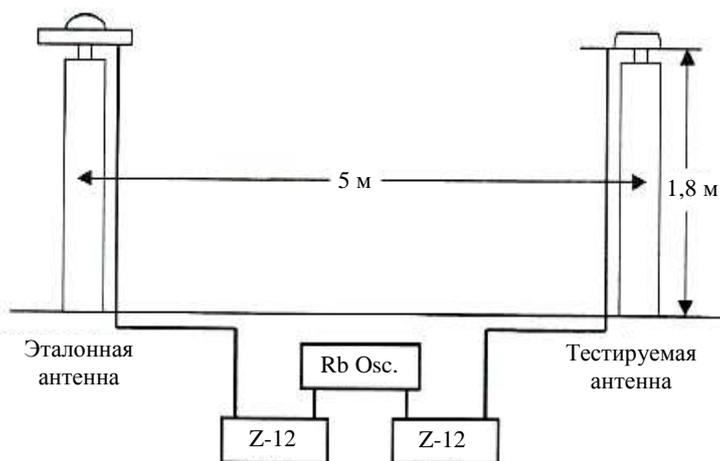


Рисунок 1 – Стенд NGS калибровки антенн, США, штат Virginia

Тестовый полигон состоит из двух фундаментальных пунктов с принудительным центрированием, расположенных вдоль меридиана на расстоянии 5 м. В качестве эталонной антенны используется антенна типа JPL D/M+CRT. Эталонная и тестируемая антенны подключены к ресиверам типа Ashtech Z-12, использующим рубидиевый генератор в качестве внешнего стандарта частоты. Подобный тест дает относительную калибровку тестируемой антенны по отношению к эталонной антенне.

Абсолютные калибровки антенн лишены практически всех недостатков, присущих относительным калибровкам, в том числе и эффекта многолучевости. Подход основан на автоматических калибровках в реальном времени, с использованием робота (рис. 2), способного изменять свое положение путем наклона и азимутального поворота. Калибровка позволяет не только оценить зависимость РСВ-смещения от высоты спутникового созвездия, но и азимутальную зависимость [2; 3].

Идентичные многолучевые условия возникают при прохождении одного и того же спутникового созвездия над одной и той же точкой. Различия между РСВ-смещениями, выполненными при статических наблюдениях на точке в один день и наблюдениях с изменением ориентации (повороты и наклоны) в другой день, дают возможность определить истинные значения вариаций фазового центра антенны без эффекта многолучевости путем сферического гармонического анализа. Калибровка, свободная от эффекта многолучевости, также может быть получена в безэховой камере (рис. 3) аналогичным способом с использованием робота [4]. Отличием является то, что антенна принимает сгенерированный синусоидальный сигнал, а не реальный.



Рисунок 2 – Робот DSNDGU\_002\_UHF\*, выполняющий абсолютные калибровки антенн

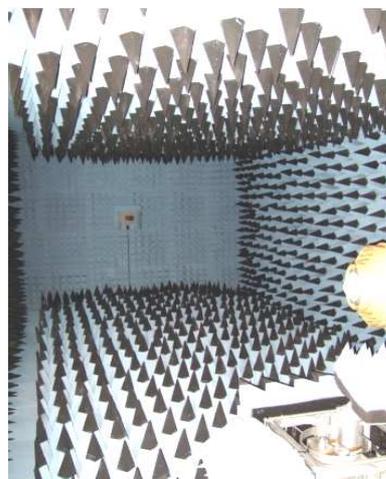


Рисунок 3 – Абсолютная калибровка в безэховой камере

Существует ещё один фактор, который влияет на приём сигнала. Этим фактором является наличие купола у антенны. В общем случае антенна с куполом должна рассматриваться как другой тип антенны со своими собственными характеристиками и особенностями.

В рамках исследования авторами выполнена оценка влияния использования относительных и абсолютных калибровок путем обработки 10 векторов, имеющих различную длину, возвышение, тип используемого оборудования и геометрию спутникового созвездия (рис. 4).



Рисунок 4 – Схема векторов, используемых для оценки влияния использования относительных и абсолютных калибровок

Векторы получены по двухдневным измерениям на 13 пунктах европейской сети постоянно действующих станций EUREF. Файлы наблюдений для данных пунктов были обработаны в программе Trimble Business Center дважды. В первом сетевом решении использовались значения относительных калибровок IGS из программного обеспечения Trimble Business Center; во втором – абсолютные калибровки, полученные из файла *igs\_antennas.atx*.

Различия двухдневных решений векторов, полученных на основе абсолютных и относительных калибровок, представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Различия двухдневных решений векторов, полученных на основе абсолютных и относительных калибровок**

От точки	До точки	Точность в плане (м)	Точность по высоте (м)	$\Delta X$ (м)	$\Delta Y$ (м)	$\Delta Z$ (м)	Эллипсоидальное расстояние (м)
LARM	ORID	0,007	0,012	-0,006	-0,002	0,001	215763,842
AUT1	LARM	0,005	0,009	0,014	0,004	0,003	118103,210
AUT1	DUTH	0,008	0,012	0,005	0,004	0,003	173421,014
AUT1	ORID	0,006	0,009	0,006	0,003	0,004	196453,647
BZRG	ZOUF	0,006	0,008	0,005	0,006	0,002	125741,023
BZRG	ROVE	0,003	0,005	0	0,006	0,002	71046,316
MOPS	ROVE	0,005	0,009	-0,003	0,006	0,004	140682,970
PADO	ROVE	0,003	0,006	-0,004	0,006	0,003	85467,444
MATE	USAL	0,008	0,012	0	0,001	0,005	124281,558
KAD 6	VAE6	0,004	0,008	-0,001	0	-0,003	118786,574

Для наглядности пространственные разности абсолютных и относительных калибровок векторов представлены на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера (табл. 2).

**Таблица 2 – Разности абсолютных и относительных калибровок векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера**

Векторы	Разности абсолютных и относительных калибровок		
	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м
AUT1-LARM	0,005	0	-0,004
LARM-ORID	-0,008	-0,001	0,013
AUT1-DUTH	-0,002	0,002	0,006
AUT1-ORID	-0,002	0,001	0,007
BZRG-ZOUF	-0,003	0,005	0,006
BZRG-ROVE	0	0,006	0,003
MOPS-ROVE	0,003	0,007	0,002
PADO-ROVE	0,004	0,007	0
MATE-USAL	0,003	0,001	0,003
KAD6-VAE6	0	0,001	-0,003

Использование различных калибровок – один из нескольких факторов, влияющих на результаты спутниковых измерений. Большое значение имеет влияние внешней среды на результаты спутниковых измерений, проявляющееся как через изменения времени прохождения радиосигналов от спутника до приемника, так и через возникновение многолучевости, обусловленной отражениями радиосигналов от тех или иных отражающих поверхностей. В некоторых случаях используется понятие «маска по углу возвышения» – это угол, отсчитываемый от горизонта, ниже которого спутники не используются. Применение минимального угла отсечки позволяет оценить и в большей степени исключить тропосферные и ионосферные задержки, однако для работ на участках, имеющих местные препятствия, для исключения многолучевости сигнала приходится увеличивать значение маски возвышения.

Оценка влияния использования различных масок по углу возвышения выполнена для ранее используемых векторов сети EUREF путем обработки каждого вектора в программе Trimble Business Center с различной маской по углу возвышения: 5°, 10°, 15 и 20°.

Пространственные разности использования исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов приведены в таблице 3. Разности исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера представлены в таблице 4.

**Таблица 3 – Пространственные разности использования исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов сети EUREF**

Векторы	Разности								
	5...10°			5...15°			5...20°		
	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
AUT1-LARM	0,005	0,002	0,005	0,007	0,005	0,007	0,007	0,006	0,006
LARM-ORID	0,008	0,003	0,006	0,011	0,006	0,005	0,011	0,005	0,005
AUT1-DUTH	0	0	-0,001	-0,003	0	-0,001	-0,006	-0,005	-0,006
AUT1-ORID	-0,001	-0,001	0	0,001	0,003	0,003	0,003	0,007	0,005
BZRG-ZOUF	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004
BZRG-ROVE	0,001	-0,001	0,003	0,006	0	0,008	0,012	0,001	0,013
MOPS-ROVE	0,008	0,001	0,005	0,011	0	0,009	0,021	0	0,019
PADO-ROVE	0,005	-0,001	0,004	0,01	-0,001	0,01	-0,003	0	-0,009
MATE-USAL	-0,001	0,003	0,002	-0,001	0,005	-0,002	-0,001	0,008	0,002
KAD6-VAE6	0,001	0,001	0,004	-0,001	0,001	0,001	-0,002	0,001	0

**Таблица 4 – Разности исходного значения маски в 5° и других значений маски для векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера**

Векторы	Разности								
	5...10°			5...15°			5...20°		
	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м	$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м
AUT1-LARM	0	0	0,007	0	0,002	0,011	-0,001	0,003	0,010
LARM-ORID	-0,001	-0,001	0,011	-0,004	0,001	0,013	-0,004	0	0,013
AUT1-DUTH	-0,001	0	-0,001	0,001	0,001	-0,003	0	-0,002	-0,010
AUT1-ORID	0	0	-0,001	0,001	0,003	0,003	0	0,006	0,007
BZRG-ZOUF	0	-0,001	-0,001	0	-0,001	-0,001	-0,001	-0,003	-0,004
BZRG-ROVE	0,001	-0,001	0,003	0,001	-0,001	0,010	0	-0,001	0,018
MOPS-ROVE	-0,002	0	0,009	-0,001	-0,002	0,014	-0,001	-0,004	0,028
PADO-ROVE	0	-0,002	0,006	0,001	-0,003	0,014	-0,004	0	-0,008
MATE-USAL	0,001	0,003	1	-0,002	0,005	-0,001	0	0,008	0,002
KAD6-VAE6	0,001	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	-0,001

Также фактором, влияющим на прием сигнала, является наличие купола у антенны. В общем случае антенна с куполом должна рассматриваться как другой тип антенны со своими собственными характеристиками и особенностями. Значительное влияние на вариации фазовых центров антенн оказывают как форма купола антенны, так и его конструкция с точки зрения материалов и расположения купола относительно самой антенны.

Наиболее используемыми куполами можно назвать купола SCIS (SCIT) и LEIS (LEIT). SCIS-купол фиксируется стальными винтами и является более надежным, изготовлен из жесткого пластика. Антенна полностью находится под куполом, так как диаметр купола превышает на 3 см диаметр антенны. LEIS-купол ввинчивается непосредственно в кольцо корпуса антенны пластмассовыми винтами, образуя полусферическую крышку с вертикальными стенками (рис. 5).



**Рисунок 5 – Внешний вид куполов Leica LEIS и SCIS  
для антенны LEIAT504**

Выполненная оценка влияния использования различных куполов при обработке используемых ранее векторов сети EUREF представлена в таблице 5.

**Таблица 5 – Влияние использования различных куполов при обработке векторов сети EUREF**

Вектор	Без куполов			С куполом			Разности		
	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
AUT1-LARM (LEIS-LEIT)	83113,661	-22163,639	-80929,115	...,661	...,639	...,115	0	0	0
AUT1-LARM (OLGA-LEIM)	83113,661	-22163,639	-80929,115	...,688	...,628	...,092	-0,027	-0,011	-0,023
BZRG-ZOUF (LEIT-SCIT)	-29947,446	122024,79	5625,362	...,450	...,78	...,354	0,004	0,003	0,008
BZRG-ZOUF (SCIT-SCIS)	-29947,446	122024,79	5625,362	...,420	...,800	...,393	-0,029	-0,009	-0,031
PADO-ROVE (LEIS-LEIS)	-24201,437	-72830,624	37616,197	...,440	...,618	...,200	-0,001	-0,006	-0,003
MATE-USAL (LEIS-LEIS)	-14407,636	120495,55	-26839,203	...,640	...,550	...,200	0	0	-0,003
KAD6-VAE6 (LEIT-LEIT)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,312	...,970	...,138	0	0,001	0
KAD6-VAE6 (SCIS-SCIS)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,311	...,970	...,139	0,001	0,001	0,001
KAD6-VAE6 (SCIT-SCIT)	88642,312	-66396,969	-42947,138	...,311	...,970	...,138	0,001	0,001	0

Разности приращений координат векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера, полученные при использовании различных куполов, представлены в таблице 6.

**Таблица 6 – Разности приращений координат векторов на плоскости в проекции Гаусса – Крюгера при использовании различных куполов**

Векторы	Типы купола	Разности абсолютных и относительных калибровок		
		$\Delta x$ , м	$\Delta y$ , м	$\Delta H$ , м
AUT1-LARM	(LEIS-LEIT)	0	0	0
AUT1-LARM	(OLGA-LEIM)	0,001	0	-0,038
BZRG-ZOUF	(LEIT-SCIT)	0	0,009	0,010
BZRG-ZOUF	(SCIT-SCIS)	-0,002	-0,003	-0,042
PADO-ROVE	(LEIS-LEIS)	-0,003	-0,007	0
MATE-USAL	(LEIS-LEIS)	-0,005	-0,001	0,001
KAD6-VAE6	(LEIT-LEIT)	0	0,001	0
KAD6-VAE6	(SCIS-SCIS)	-0,001	0,001	0,002
KAD6-VAE6	(SCIT-SCIT)	-0,001	0	0,001

**Заключение.** Результаты проведенного исследования свидетельствуют, что для достижения высокой точности при работе с любыми типами антенн необходимо использовать калибровки. Из представленных выше примеров видно, что вариации фазовых центров для любой антенны могут быть определены только на основании детальных исследований высокой точности. Факторами, влияющими на изменение фазового центра GPS-антенны, являются: геометрия спутникового созвездия, возвышение спутников над горизонтом, форма куполов антенн, материал куполов, эффект многолучевости. Однако их природа еще не до конца изучена. Относительные калибровки неплохо зарекомендовали себя при малых сетях с короткими базовыми линиями. Обработка значительных по масштабу сетей требует абсолютных калибровок, а также учета ряда факторов. Активное использование абсолютных калибровок PCV открывает новые перспективы для будущих исследований. Обязательным является точное изучение ошибок, возникающих из-за эффекта многолучевости, а также из-за тропосферных эффектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mader, Gerald L. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey / L. Gerald Mader // National Geodetic Survey N/NG56, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20810.
2. Schmitz, M., Special Tests of Phase Center Variations of Various GPS Antennas and Some Results / M. Schmitz; ed. // Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen, Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, Hannover, 2001, P. 101–112.
3. Schmitz, M. Absolute Receiver Antenna Calibrations with a Robot / Martin Schmitz, Gerhard Wübbena, Gerald Boettcher // IGS Workshop "Towards Real-Time", April 8–11, 2002, Ottawa, Canada.
4. Volksen, Ch. The importance of correct antenna calibration models for the EUREF Permanent Network / Ch. Volksen // National Report of the Federal Republic of Germany on the Geodetic Activities in the Years 1999–2003. – München, 2003.

Поступила 02.12.2015

#### VARIATIONS OF THE PHASE CENTERS OF VARIOUS GPS ANTENNAS ANALYSIS OF THE USE OF ABSOLUTE AND RELATIVE CALIBRATIONS OF ANTENNAS

V. YALTYHOV, K. MARKOVICH

*The article is devoted to the analysis of the spatial variation of phase center of various GPS-antennas depending on the direction of the signal from the satellite. Dependence of change azimuthal and the high-rise making variations of the phase centers of antennas are defined. Recommendations about use of the corresponding types of calibrations of variations of the phase centers are made.*

УДК 528.3

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ПОПРАВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ДАЛЬНОМЕРА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

канд. техн. наук, доц. С.Д. КРЯЧОК

(Черниговский национальный технологический университет, Украина)

Описана математическая модель определения постоянной поправки электронного дальномера при безбазисном способе измерения расстояний, горизонтальных углов с трех станций в направлениях на крайние и средний штативы с учетом углов наклона линий. На основе этой модели выведена формула для определения средней квадратической погрешности постоянной дальномера. Выполнен расчет точности работы приборов с ошибкой измерения расстояний  $2 + 2 \text{ ppm}$ , горизонтальных и вертикальных углов  $10''$ . Выявлена зависимость точности определения постоянной дальномера от величины измеряемых расстояний и углов, а также отступления среднего штатива от середины створа крайних.

При определении расстояний электронными тахеометрами и дальномерами необходимо знать постоянную поправку дальномера. Значение этой поправки может изменяться вследствие разных причин. Поэтому в инструкциях по эксплуатации данных приборов предлагается периодически уточнять ее значение. В случае использования для измерений расстояний дальномеров и отражателей разных производителей или модификаций определение значения постоянной поправки обязательно [1].

Существует несколько вариантов определения постоянной поправки дальномера, особенности которых приведены в инструкциях по эксплуатации электронных тахеометров и дальномеров. Они рассмотрены также в работах [1; 2]. Наиболее надежно постоянную поправку дальномера можно получить на базе из нескольких линий, где выполняются измерения расстояний электронным дальномером. В результате, определяется значение постоянной поправки. Однако в полевых условиях не всегда есть возможность разбить базис с высокоточным определением его отрезков, поэтому особого внимания заслуживает рассмотрение безбазисного способа.

**Основная часть.** Известны два варианта безбазисных определений постоянной поправки. Первый вариант: электронным дальномером измеряется несколько линий, расположенных в створе, во всех возможных комбинациях, а отдельные значения постоянной поправки вычисляются как разность длины замыкающей линии и двух ее составляющих [2]. Электронный дальномер и отражатель рекомендуется устанавливать на одной высоте [1]. Назовем этот вариант безбазисным створным способом. Второй вариант: измерения линий выполняются с трех штативов, центральный штатив под номером 2 устанавливается вне створа двух крайних под номерами 1 и 3. С крайних штативов на центральный измеряются горизонтальные углы  $\beta_1$  та  $\beta_3$ , а постоянная поправка  $V$  определяется по формуле [1]

$$V = \frac{S_{12} \cos \beta_1 + S_{32} \cos \beta_2 - S_{13}}{1 - \cos \beta_1 - \cos \beta_3}. \quad (1)$$

Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения постоянной поправки из одного приема измерений рассчитывается следующим образом [1]:

$$m_v = \frac{1}{1 - \cos \beta_1 - \cos \beta_2} \sqrt{(1 + \cos^2 \beta_1 + \cos^2 \beta_3) m_s^2 + 2\Delta^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}, \quad (2)$$

где  $m_s, m_\beta$  – СКП измерений линий и горизонтальных углов соответственно;  $\Delta$  – величина отклонения центрального штатива от створа двух крайних;  $\rho = 206265''$ . Этот вариант назовем безбазисным вне-створным способом.

В [1] указываются ограничения во взаимном расположении дальномера и отражателя в вертикальной плоскости, поскольку в формуле (1) не учитываются значения углов наклона измеренных линий.

Учитывая технические возможности электронных тахеометров, необходимо создать математическую модель определения постоянной поправки дальномера, которая учитывала бы как измеренные расстояния, так и горизонтальные углы, и углы наклона измеренных линий. На основании математической модели возможно оценить точность определения постоянной поправки дальномера.

На станции определения постоянной поправки (рис. 1) в точках 1, 2 и 3 устанавливаются штативы с закрепленными на них подставками. Точки на местности не фиксируются. В точке 1' на высоте инструмента закрепляется в подставке электронный дальномер.

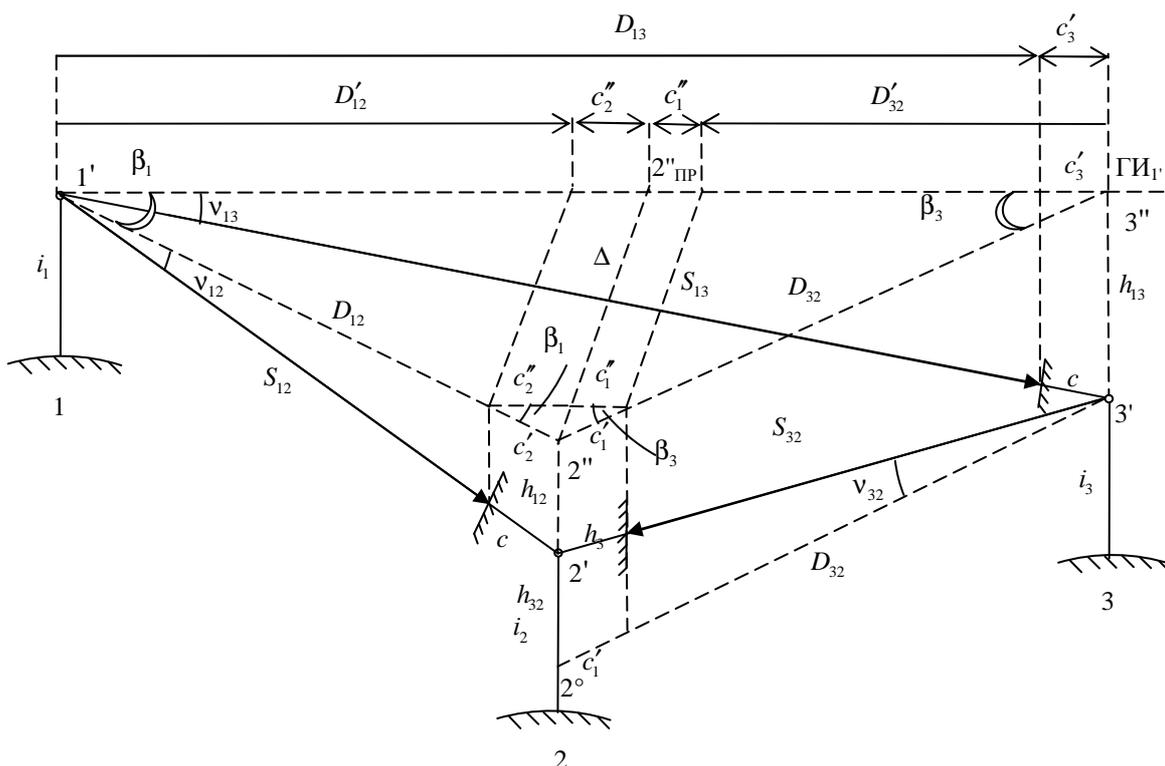


Рисунок 1 – Пространственные параметры линий на станции определения постоянной дальномера

Поочередно на подставки в точках 2' и 3' на высотах инструмента  $i_2$  и  $i_3$  устанавливается отражатель и измеряются длины  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ , углы наклона этих линий  $v_{12}$ ,  $v_{13}$  и горизонтальный угол  $\beta_1$ . Затем в точке 3' на подставку устанавливается электронный тахеометр, измеряется наклонное расстояние  $S_{32}$ , угол наклона этой линии  $v_{32}$  и горизонтальный угол  $\beta_3$ . Все три полученные значения расстояний содержат постоянную поправку дальномера  $c$ . Обычно постоянная поправка имеет отрицательное значение, то есть измеренная линия длиннее фактической. На рисунке 1 для упрощения чертежа измеренные линии изображены короче, чем фактические, поэтому величина  $c$  имеет положительное значение.

Проведем горизонтальную плоскость, которая соответствует горизонту инструмента точки 1' ( $GI_1'$ ) и проходит через точки 1', 2'', 3''. Спроектируем на эту плоскость каждую из измеренных линий и постоянную дальномера  $c$ . Воспользовавшись соответствующими углами наклона  $v_{ij}$ , получим горизонтальные расстояния  $D_{ij}$  и горизонтальные составляющие  $c'_i$  постоянной поправки дальномера. Далее на горизонтальное расстояние  $(D_{13} + c'_3)$  спроецируем два других горизонтальных расстояния и составляющие постоянной поправки дальномера, которые расположены под углами  $\beta_1$  и  $\beta_3$  к первому. Получим проекции  $D'_{12}$ ,  $c''_2$ ,  $D'_{32}$ ,  $c''_1$ . Тогда при условии, что

$$D_{13} + c'_3 = D'_{12} + c''_2 + D'_{32} + c''_1, \tag{3}$$

величина постоянной поправки дальномера

$$c = \frac{S_{12} \cos v_{12} \cos \beta_1 + S_{32} \cos v_{32} \cos \beta_3 - S_{13} \cos v_{13}}{\cos v_{13} - \cos v_{12} \cos \beta_1 - \cos v_{32} \cos \beta_3}. \tag{4}$$

Формула (3) дает возможность определить постоянную поправку дальномера по значениям измеренных наклонных расстояний  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{32}$ , горизонтальных углов  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и углов наклона  $v_{12}$ ,  $v_{32}$ ,  $v_{13}$ . Это трехмерная математическая модель определения постоянной поправки. Понятно, что измерения углов можно производить, если дальномер закреплен на теодолите (например, СТ-5) или отдельно – при помощи теодолита.

Для электронных тахеометров, которые дают возможность получить горизонтальные проложения, формулу (4) можно записать в таком виде:

$$c = \frac{D_{12} \cos \beta_1 + D_{32} \cos \beta_3 - D_{13}}{\cos v_{13} - \cos v_{12} \cos \beta_1 - \cos v_{32} \cos \beta_3}. \quad (5)$$

Из рисунка 1 видно, что все пространственные элементы есть обязательные аргументы для определения поправки  $c$  в формуле (4), а потому являются математически независимыми и некоррелированными между собой. С учетом этого обстоятельства после дифференцирования (4) и без учета членов высших порядков средняя квадратическая ошибка постоянной поправки дальномера составит

$$m_c^2 = \frac{1}{B^2} \left\{ (S_{12}^2 - h_{12}^2 - \Delta^2) \left( \frac{m_{S_{12}}}{S_{12}} \right)^2 + (S_{32}^2 - h_{32}^2 - \Delta^2) \left( \frac{m_{S_{32}}}{S_{32}} \right)^2 + (S_{13}^2 - h_{13}^2) \left( \frac{m_{S_{13}}}{S_{13}} \right)^2 + \left[ h_{12}^2 + h_{32}^2 + h_{13}^2 - \Delta^2 \left( 2 - \frac{1}{\cos^2 v_{12}} - \frac{1}{\cos^2 v_{32}} \right) \right] \left( \frac{m_v}{\rho} \right)^2 + 2\Delta^2 \left( \frac{m_\beta}{\rho} \right)^2 \right\}, \quad (6)$$

где  $B = \cos v_{13} - \cos v_{12} \cos \beta_1 - \cos v_{32} \cos \beta_3$ ;  $h_{ij}$  – превышения измеренных линий относительно точек стояния дальномера;  $m_{S_{ij}}$  – СКП измерения линий;  $m_v$ ,  $m_\beta$  – СКП измерения вертикальных и горизонтальных углов.

Воспользовавшись формулой (6), можно рассчитать СКП определения постоянной поправки электронных дальнометров, параметры точности которых составляют:  $m_s = 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм}$ ;  $m_\beta = m_v = 10''$ . Исходными данными будут значения:  $\Delta$ ,  $v_{12}$ ,  $v_{13}$ ,  $m_\beta$ ,  $m_v$ ,  $m_{S_{ij}}$ . При этом центральный штатив устанавливается посередине, между двумя другими штативами, или он смещен со середины створа по перпендикуляру на величину  $\Delta$ . Линии  $S_{12}$  и  $S_{13}$  имеют равные углы наклона к горизонту ( $v_{12} = v_{13}$ ). Пренебрегая значением постоянной поправки дальномера, которое не превышает для большинства моделей электронных дальнометров нескольких сантиметров [1], и на основании рисунка 1 имеем:

$$\beta_1 = \beta_2 = \arctg \frac{2\Delta}{S_{13} \cos v_{13}}; D_{12} = D_{32} = \sqrt{\left( \frac{S_{13} \cos v_{13}}{2} \right)^2 + \Delta^2}; S_{12} = \frac{D_{12}}{\cos v_{12}};$$

$$h_{12} = S_{12} \sin v_{12}; h_{13} = S_{13} \sin v_{13}; h_{32} = h_{13} - h_{12}; v_{32} = \arctg \frac{h_{32}}{D_{32}}; S_{32} = \frac{D_{32}}{\cos v_{32}}.$$

Контроль:  $\Delta = S_{32} \cos v_{32} \sin \beta_3$ .

Результаты расчетов по данным формулам и формуле (6) приведены в таблицах 1–3, в которых  $m_s$  – значения СКП измерения расстояний (при условии, что  $m_{S_{12}} = m_{S_{13}} = m_{S_{32}} = m_s$ ), соответствующие первым трем слагаемым формулы (6),  $m_v$  – СКП измерения вертикальных углов (четвертое слагаемое формулы (6)),  $m_\beta$  – СКП измерения горизонтальных углов (пятое слагаемое формулы (6)). Последний столбец таблиц соответствует СКП определения постоянной поправки дальномера из трех приемов.

Таблица 1 – Значения  $m_c$  для расстояния  $S_{13} = 25 \text{ м}$

$v_{12}^\circ = v_{13}^\circ$	$\Delta$ , м	$\beta^\circ$	$m_s$ , мм	$m_v$ , мм	$m_\beta$ , мм	$m_c$ , мм	$m_c / \sqrt{3}$ , мм
$S_{13} = 25 \text{ м}$							
0	0	0	3,58	0	0	3,58	2,07
0	2	4,57	3,58	0	0,14	3,59	2,07
0	4	9,09	3,60	0	0,27	3,60	2,08
10	0	0	3,50	0,26	0	3,50	2,02
10	2	9,23	3,51	0,27	0,14	3,52	2,03
10	4	18,00	3,56	0,28	0,27	3,58	2,07
20	0	0	3,41	0,54	0	3,46	2,00
20	2	9,66	3,43	0,55	0,14	3,48	2,01
20	4	18,81	3,48	0,59	0,27	3,54	2,04
							$m_{S_{13}} = 2,05 \text{ мм}$

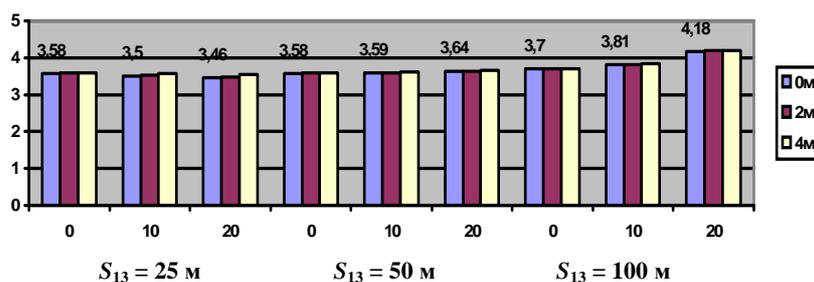
Таблица 2 – Значения  $m_c$  для расстояния  $S_{13} = 50$  м

$v_{12}^\circ = v_{13}^\circ$	$\Delta$ , м	$\beta^\circ$	$m_s$ , мм	$m_v$ , мм	$m_b$ , мм	$m_c$ , мм	$m_c / \sqrt{3}$ , мм
$S_{13} = 100$ м							
0	0	0	3,58	0	0	3,58	2,07
0	2	4,57	3,58	0	0,14	3,59	2,07
0	4	9,09	3,60	0	0,27	3,60	2,80
10	0	0	3,55	0,52	0	3,59	2,07
10	2	4,64	3,56	0,53	0,14	3,60	2,08
10	4	9,23	3,60	0,54	0,27	3,62	2,09
20	0	0	3,47	1,08	0	3,64	2,1
20	2	4,87	3,47	1,09	0,14	3,64	2,10
20	4	9,66	3,49	1,10	0,27	3,67	2,12
							$m_{S_{13}} = 2,1$ мм

Таблица 3 – Значения  $m_c$  для расстояния  $S_{13} = 100$  м

$v_{12}^\circ = v_{13}^\circ$	$\Delta$ , м	$\beta^\circ$	$m_s$ , мм	$m_v$ , мм	$m_b$ , мм	$m_c$ , мм	$m_c / \sqrt{3}$ , мм
$S_{13} = 50$ м							
0	0	0	3,70	0	0	3,70	2,13
0	2	2,29	3,70	0	0,14	3,70	2,14
0	4	4,57	3,70	0	0,27	3,71	2,14
10	0	0	3,67	1,05	0	3,81	2,20
10	2	2,33	3,67	1,05	0,14	3,82	2,20
10	4	4,64	3,67	1,05	0,27	3,83	2,21
20	0	0	3,58	2,16	0	4,18	2,42
20	2	2,44	3,58	2,16	0,14	4,19	2,42
20	4	4,87	3,59	2,17	0,27	4,2	2,43
							$m_{S_{13}} = 2,2$ мм

Рисунок 2 иллюстрирует результаты расчетов. Приведены значения: по вертикали – СКП постоянной дальномера; по горизонтали – значения углов наклона, равные  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ . Цифры над изображением соответствуют значениям СКП постоянной дальномера для положения среднего штатива в створе и нулевых значений углов наклона.

Рисунок 2 – Диаграмма зависимости  $m_c$  от  $\Delta$  и углов наклона для разных значений  $S_{13}$ 

Анализ данных таблиц 1–3 и диаграммы позволяет сделать следующие *выводы*:

- увеличение расстояния между крайними штативами вызывает постепенное увеличение погрешности определения постоянной дальномера;
- увеличение смещения среднего штатива от створа на несколько метров приводит к постепенному росту погрешности определения постоянной дальномера;
- увеличение углов наклона измеряемых линий относительно линии горизонта обеспечивает плавное уменьшение погрешности определения постоянной дальномера – для расстояний между крайними штативами до трех десятков метров и меньше и плавное увеличение погрешности определения постоянной дальномера для больших расстояний;

- среднее значение постоянной дальномера, определенное с трех станций, не превышает точность измерения линий при расстояниях между крайними штативами до 50 м, улов наклона до  $20^\circ$ , отклонения от створа до 4 м и точность измерения линий при расстоянии между крайними штативами до 100 м, углов наклона до  $10^\circ$ , отклонения от створа до 4 м.

Последний вывод свидетельствует о том, что при указанных ограничениях точность определения постоянной дальномера тремя приемами практически равна постоянной составляющей 2 мм в формуле точности данного электронного дальномера  $m_S = 2 \text{ мм} + 2 \text{ мм} \cdot S \cdot 10^{-6}$ . В этом случае после введения поправки в измеренную линию ее СКП составит  $m_{S'} = \sqrt{m_S^2 + m_{c_{cp}}^2}$ .

Такая точность измерения линий может удовлетворять конкретному виду геодезических работ.

Чтобы ошибка определения постоянной поправки дальномера не влияла на точность измерения коротких линий  $S_{\min}$ , необходимо выполнить измерения для  $N$  приемов, вычислить среднее значение  $c_{cp}$  и выполнить следующее условие:

$$m_{c_{cp}} = \frac{1}{3} m_{S_{\min}}. \quad (7)$$

Значение  $m_{S_{\min}} = a$  (с учетом формулы точности электронного дальномера  $m_S = a + b \cdot S_{\text{км}}$ ). Тогда количество приемов с учетом формулы (7) и известной зависимости

$$m_{c_{cp}} = \frac{m_c}{\sqrt{N}}$$

будет определяться по выражению

$$N = 9 \frac{m_c^2}{a^2}. \quad (8)$$

Например, для  $S_{13} = 25 \text{ м}$ ,  $v_{12} = v_{13} = 10^\circ$ ,  $\Delta = 4 \text{ м}$ ,  $m_c = 3,58 \text{ мм}$  (см. табл. 1),  $a = 2 \text{ мм}$  получим  $N = 29$  приемов.

В каждом новом приеме необходимо менять положение крайнего и среднего штативов.

Из формулы (4) видно, что при условии  $v_{12} = v_{13} = v_{32}$  и  $\beta_1 = \beta_3$

$$c = S_{13} - (S_{12} + S_{32}). \quad (9)$$

Полученная зависимость (9) соответствует размещению приборов в створе линии  $1' \dots 3'$ , которая может быть наклонной (рис. 3).

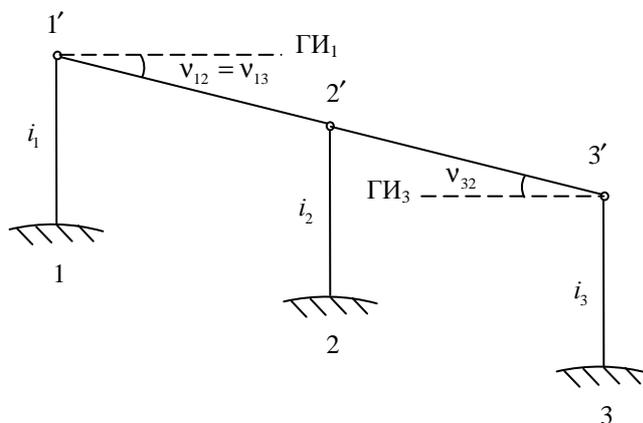


Рисунок 3 – Размещение штативов на наклонной линии

По формуле (9) рассчитывается постоянная поправка для безбазисного створного способа. Это доказывает, что для створного безбазисного способа определения постоянной поправки дальномера штати-

вы с дальномером и отражателем можно размещать на одной наклонной линии и не стремиться их устанавливать на равной высоте, как это требуется, например, в [1].

**Заключение.** В результате теоретических исследований получена новая формула для вычисления постоянной поправки электронных дальномеров безбазисным внестворным способом с учетом углов наклона измеряемых линий и горизонтальных углов.

Выведена формула для определения средней квадратической погрешности определения постоянной поправки дальномера для данного способа и проведена оценка точности ее определения для электронных дальномеров с заданными параметрами точности.

Предложенная методика позволяет определять постоянную поправку дальномера на местности с выраженным рельефом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошилов, А.П. Определение постоянной поправки дальномера электронного тахеометра / А.П. Ворошилов // Геопрофи. – 2005. – № 4. – С. 46–47.
2. Крячок, С.Д. До визначення постійної поправки електронних віддалемірів / С.Д. Крячок // Вісник геодезії та картографії. – 2015. – № 2. – С. 4–7.

Поступила 06.12.2015

#### ON THE DETERMINATION OF CONSTANT CORRECTION ELECTRONIC RANGEFINDER IN FIELD CONDITIONS

**S. KRYACHOK**

*The mathematical model for determining the constant correction for measuring distances of electronic rangefinder without the use of baselines is developed. For its realization measured horizontal angles with three stations in the direction of extreme and average tripods, lines and vertical angles of lines. On the basis of this model is developed a formula to determine the mean square error of constant correction. Made the calculation precision of the instruments with the error of measurement of distances  $2 + 2$  ppm, horizontal and vertical angles  $10''$ . Found the tendency of changes in the accuracy of determining the constant corrections depending on the measured distances and angles, as well as deviations the average tripod from mid line extreme tripods.*

УДК 528.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИЗИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

**К.И. МАРКОВИЧ; А.В. ВАЛЮШКИН**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ погрешностей визирования и измерения линий, возникающих при нестрогом ориентировании геодезического отражателя на дальномер. Определена зависимость величины ошибки от условий ориентирования и конструкции отражателя. Сделан вывод, что использование призмных отражателей при выполнении инженерно-геодезических работ, а также применение пленочных отражателей при закреплении геодезических сетей для работ повышенной точности возможно лишь при строгом ориентировании их отражающей поверхности на дальномер.*

Геодезические отражатели являются важными приспособлениями при производстве геодезических работ. Однако многие геодезисты при выборе оборудования пристальное внимание обращают на характеристики тахеометра, забывая о влиянии отражателя на точность измерений. Для выполнения высокоточных измерений необходимо учитывать всевозможные факторы влияния геодезических отражателей на измерение углов и расстояний.

Основными факторами, имеющими наибольшее влияние на результаты геодезических измерений, являются точность центрирования отражателя при сборке (соосность отражателя) и строгое ориентирование отражательной поверхности на дальномер [1].

Рассмотрим влияние погрешностей визирования и измерения линий, возникающих при нестрогом ориентировании призмных и пленочных отражателей на дальномер.

Исследование выполнялось в различное время для двух линий различной длины с учетом температуры и давления при выполнении серий.

**Таблица 1 – Характеристики серий измерений**

Серия	Измеряемое расстояние, м	Температура, °С		Давление, мм рт. ст.
		начало серии	конец серии	
1	50	9	6	749
2	100	15	13	747

Измерение линий выполнялось как на призмный, так и на пленочный отражатели с использованием электронного тахеометра Trimble M3 2013 DR5 с заявленной изготовителем погрешностью дальномера 2 мм + 2 ppm на призму и 3 мм + 2 ppm в безотражательном режиме [2].

В качестве визирных целей при выполнении измерений использовался призмный отражатель фирмы Leica серии GPH1 с заявленной изготовителем точностью центрирования в 2 мм [3], а также отражательная пленка фирмы ORAFOL размером 100 × 100 мм (рис. 1) [4].



**Рисунок 1 – Конструкции визирных целей**

Методика исследования состояла в выполнении измерений линий и направлений при развороте отражателей с заданным шагом в  $10^\circ$  в горизонтальной (призменный и пленочный отражатели), вертикальной (призменный) и горизонтально-вертикальной плоскостях (призменный). Во всех сериях измерения расстояний на призменный отражатель выполнялось в стандартном режиме дальномера STD, измерения на пленочный отражатель – в безотражательном режиме DR. Результаты усреднялись по трем значениям измерений. Исследование выполнялось в условной системе координат, в которой ось  $X$  совпадала с визирной линией на отражатель при расположении отражающей поверхности перпендикулярно (угол разворота отражателя равен 0).

Ниже представлены результаты измерения расстояний и направлений, полученные путем усреднения трех значений измерений. В таблицах 2–4 представлены данные эксперимента для расстояний 50 и 100 метров и разворота призмы в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Зависимости погрешностей измерения направлений и линий от угла разворота призмы показаны на рисунках 2–4.

Таблица 2 – Разворот призмы в горизонтальной плоскости ( $S \approx 50, 100$  м)

Разворот призмы в горизонтальной плоскости										
Угол разворота	STD (на призму, $S \approx 50$ м)					STD (на призму, $S \approx 100$ м)				
	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
$50^\circ$	$-14''$	$0''$	0	$-0,004$	0,001	–	–	–	–	–
$40^\circ$	$-11''$	$-2''$	0	$-0,003$	0,001	$-10''$	$-1''$	$-0,001$	$-0,006$	0
$30^\circ$	$-6''$	$-1''$	$-0,001$	$-0,001$	0,001	$-8''$	$2''$	$-0,003$	$-0,004$	0
$20^\circ$	$-7''$	$-1''$	$-0,001$	$-0,002$	0,001	$-7''$	$-1''$	$-0,002$	$-0,004$	0,001
$10^\circ$	$-5''$	$-2''$	0,001	$-0,001$	0,001	$-4''$	$2''$	$-0,002$	$-0,002$	$-0,001$
$0^\circ$	$0''$	$90^\circ 05' 02''$	<b>50,203</b>	<b>0,000</b>	<b>0,073</b>	$0''$	$90^\circ 04' 47''$	<b>100,118</b>	<b>0,000</b>	<b>0,139</b>
$-10^\circ$	$1''$	$-1''$	0,002	0,001	$-0,001$	$2''$	$1''$	$-0,002$	0,001	0
$-20^\circ$	$2''$	$1''$	0,001	0	$-0,001$	$5''$	$-1''$	$-0,002$	0,002	$-0,001$
$-30^\circ$	$3''$	$-1''$	0,001	0	$-0,001$	$7''$	$1''$	0,001	0,004	0
$-40^\circ$	$4''$	$0''$	0	0,001	$-0,001$	$10''$	$2''$	0	0,007	0
$-50^\circ$	$8''$	$0''$	0,001	0,002	$-0,001$	–	–	–	–	–

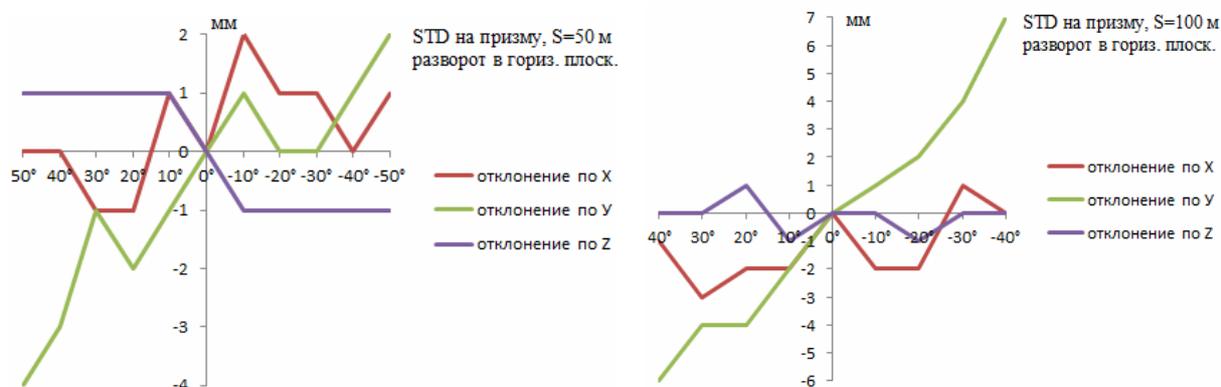


Рисунок 2 – Зависимость погрешности измерения направлений и линий от угла разворота призменного отражателя в горизонтальной плоскости

Таблица 3 – Разворот призмы в вертикальной плоскости ( $S \approx 50$  и  $100$  м)

Разворот призмы в вертикальной плоскости										
Угол разворота	STD (на призму, $S \approx 50$ м)					STD (на призму, $S \approx 100$ м)				
	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
$40^\circ$	$-1''$	$-8''$	$-0,001$	0	0,004	$0''$	$-4''$	0,001	0,001	0,002
$30^\circ$	$0''$	$-7''$	0	0	0,003	$-1''$	$-1''$	0,001	0	0,001
$20^\circ$	$0''$	$-4''$	$-0,001$	0	0,002	$0''$	$-1''$	$-0,001$	0	0,001
$10^\circ$	$0''$	$-1''$	$-0,002$	0	0	$-1''$	$-2''$	0	0	0,001
$0^\circ$	$0''$	$90^\circ 05' 02''$	<b>50,203</b>	<b>0,000</b>	<b>0,073</b>	$0''$	$90^\circ 04' 47''$	<b>100,118</b>	<b>0,000</b>	<b>0,139</b>
$-10^\circ$	$-2''$	$5''$	0	$-0,001$	$-0,002$	$0''$	$3''$	0,001	0	$-0,001$
$-20^\circ$	$1''$	$7''$	0	0	$-0,003$	$0''$	$2''$	$-0,001$	0	$-0,001$
$-30^\circ$	$1''$	$9''$	0	0	$-0,004$	$0''$	$5''$	0	0	$-0,002$
$-40^\circ$	$1''$	$10''$	0	0	$-0,007$	$0''$	$6''$	0	$-0,001$	$-0,003$

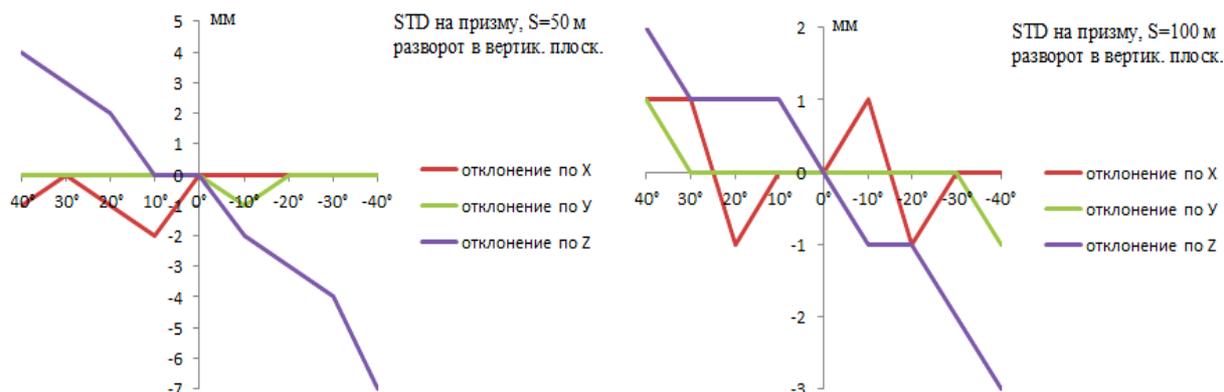


Рисунок 3 – Зависимость погрешности измерения направлений и линий от угла разворота призмного отражателя в вертикальной плоскости

Таблица 4 – Разворот призмы в горизонтальной и вертикальной плоскостях (S ≈ 50 и 100 м)

Разворот призмы в горизонтальной и вертикальной плоскости										
Угол разворота	STD (на призму, S ≈ 50 м)					STD (на призму, S ≈ 100 м)				
	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
30°/30°	-14"	-10"	0	-0,003	0,002	-5"	-8"	0	-0,002	0,004
20°/20°	-4"	-3"	-0,001	-0,001	0,001	-4"	-6"	-0,001	-0,002	0,002
10°/10°	-5"	-1"	-0,002	-0,001	0	-2"	-2"	-0,001	-0,001	0,001
<b>0°/0°</b>	<b>0"</b>	<b>90°05'02"</b>	<b>50,203</b>	<b>0,000</b>	<b>0,073</b>	<b>0"</b>	<b>90°04'47"</b>	<b>100,118</b>	<b>0,000</b>	<b>0,132</b>
-10°/-10°	1"	3"	0	0	-0,001	0"	1"	-0,001	0	0
-20°/-20°	2"	2"	0	0,001	-0,001	2"	3"	-0,001	0,001	-0,001
-30°/-30°	6"	5"	0,001	0,002	-0,002	6"	8"	-0,001	0,003	-0,003

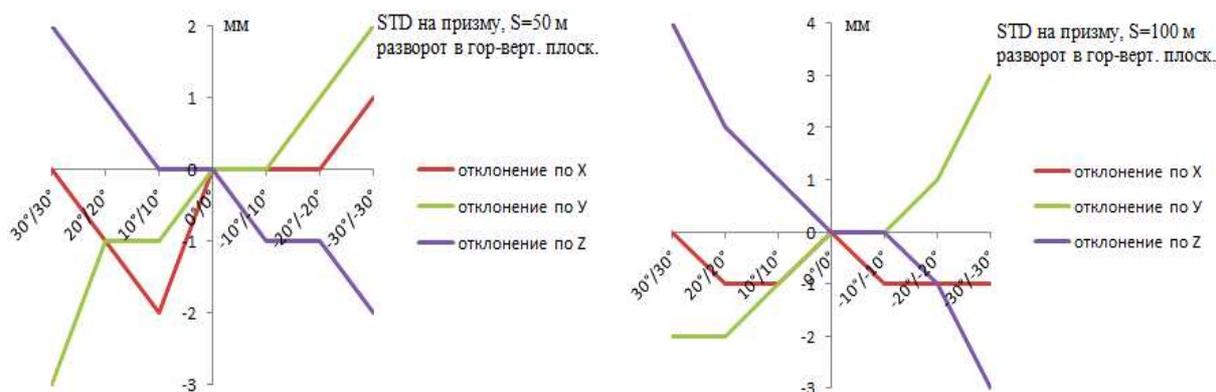


Рисунок 4 – Зависимость погрешности измерения направлений и линий от угла разворота призмного отражателя в горизонтальной и вертикальной плоскостях

По результатам эксперимента с призмным отражателем можно отметить:

- 1) максимальный разворот призмного отражателя Leica GPH1 от нормали к линии визирования составляет 50° в горизонтальной плоскости при расстоянии в 50 метров и уменьшается с увеличением длины измеряемой линии;
- 2) в рабочем диапазоне разворота призмного отражателя увеличение измеряемого расстояния не наблюдается;
- 3) разворот призмы характеризуется следующими особенностями:
  - значительный угол разворота в горизонтальной плоскости для расстояния как 50, так и 100 метров вносит значительные погрешности в измерение горизонтальных направлений и, как следствие, в поперечную компоненту  $\Delta Y$ ;

- разворот в вертикальной плоскости, близкий к предельному, значительно искажает зенитные расстояния и высотную компоненту  $\Delta Z$ ;

- разворот в обеих плоскостях имеет общую особенность ошибок как для поперечной компоненты и горизонтальных направлений, так и для высотной составляющей и зенитных расстояний.

В таблице 5 представлены данные эксперимента для расстояний 50 и 100 метров и разворота пленочного отражателя в горизонтальной плоскости. Графики зависимости погрешности измерения направлений и линий от угла разворота пленочного отражателя представлены на рисунке 5.

Таблица 5 – Разворот пленочного отражателя в горизонтальной плоскости ( $S \approx 50$  и  $100$  м)

Разворот призмы в горизонтальной плоскости										
Угол разворота	DR (на пленку, $S \approx 50$ м)					DR (на пленку, $S \approx 100$ м)				
	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м	$\Delta\alpha$	$\Delta z$	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	$\Delta Z$ , м
60°	10"	1"	0,003	0,000	0	11"	1"	0,002	0,000	0
50°	9"	0"	0,002	0,001	-0,001	10"	1"	0,002	0,001	-0,001
40°	6"	0"	0,002	0,000	0	7"	0"	0,002	0,000	0
30°	4"	1"	0,002	0,001	-0,001	6"	1"	0,001	-0,001	0
20°	3"	1"	0,002	0,001	0	2"	-1"	0	0	0
10°	1"	0"	0,001	0	0	2"	0"	0,001	0	0
0°	0"	89°48'27"	50,364	0,000	0,169	0"	89°54'32"	75,012	0,000	0,260
-10°	-2"	1"	0,001	0,000	0	-1"	0"	0,001	0	0
-20°	-3"	1"	0	0,001	0,001	-3"	-1"	0	-0,001	0
-30°	-5"	0"	0,001	0,000	0	-5"	0"	0,001	0,000	0
-40°	-6"	1"	0,002	-0,001	0,001	-7"	1"	0,001	0,000	0,001
-50°	-8"	-1"	0,002	0,000	0,001	-8"	-1"	0,002	-0,001	0,001
-60°	-11"	0"	0,003	0,000	0	-9"	0"	0,001	0,000	0

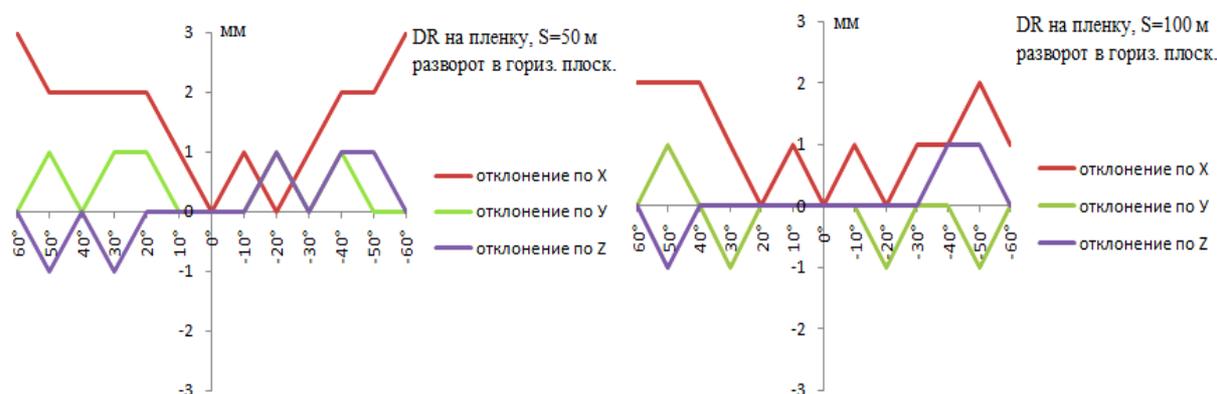


Рисунок 5 – Зависимость погрешности измерения направлений и линий от угла разворота пленочного отражателя в горизонтальной плоскости

В результатах эксперимента с пленочным отражателем наблюдаются следующие закономерности:

- максимальный разворот пленочного отражателя от нормали к линии визирования составляет 60°.
- Рост угла разворота пленки сопровождается линейной тенденцией к увеличению измеряемого расстояния;
- предельный разворот пленочного отражателя от нормали к линии визирования не влечет увеличения погрешности в результатах измерений горизонтальных направлений и в поперечной компоненте  $\Delta Y$ .

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие **выводы**:

1) максимальный диапазон углов разворота призмного отражателя составляет 40...50°, что меньше, чем у пленочного отражателя, указанный угол которого составляет 60°. Данное различие объясняется конструктивными особенностями корпуса призмного отражателя. Кроме того, максимальный угол разворота призмного отражателя зависит от величины измеряемого расстояния;

2) при измерениях на пленочный отражатель наблюдается увеличение измеряемого расстояния с увеличением угла разворота отражателя. Результаты измерения расстояний на призмный отражатель носят случайный характер;

3) рабочий разворот призмного отражателя как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости составляет  $20^\circ$ , после чего в результаты измерений привносятся значительные погрешности. Приемлемый разворот пленочного отражателя, при котором измеряемое расстояние изменяется незначительно, составляет  $40\dots 50^\circ$ ;

4) разворот призмного отражателя в горизонтальной плоскости показал стремление к увеличению погрешностей измерения горизонтальных направлений. Разворот призмы в вертикальной плоскости имеет тенденцию к увеличению погрешности измерения зенитных расстояний. Разворот пленочного отражателя в горизонтальной плоскости не вносит погрешности в измерение горизонтальных направлений;

5) на основании полученных результатов можно утверждать, что использование призмных отражателей при выполнении высокоточных инженерно-геодезических работ, а также применение пленочных отражателей при закреплении геодезических сетей для работ повышенной точности возможно лишь при строгом ориентировании их отражающей поверхности на дальномер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов, Ю.В. Ошибки визирования при наблюдениях на призмные отражатели / Ю.В. Спиридонов // Credo-Dialogue. Проблемы и решения. – 2004. – № 13.
2. Электронный тахеометр Trimble серии M3 DR 2",3",5": руководство пользователя, 2009.
3. LEICA Surveying Reflectors-White Paper Characteristics and Influences [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/view/28954131/surveying-reflectors-white-paper-characteristics-and-influences>. – Дата доступа: 03.05.2015.
4. ORAFOL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.orafol.com/corp/europe/ru/frontpage>. – Дата доступа: 03.05.2015.

*Поступила 23.11.2015*

#### RESEARCH OF FEATURES OF SIGHT AND MEASUREMENT OF LINES WITH USE OF GEODETIC REFLECTORS

*K. MARKOVICH, A. VALUSHKIN*

*The article is devoted to the analysis of the errors of sight and measuring lines, which do not arise in the strict orientation of geodetic reflector. The dependence of the magnitude of the error on the conditions of orientation and design of the reflector.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Филиппенко Я.Д.</i> Композиционные особенности развития силуэта города Полоцка в период с конца XVII до конца XIX века .....	2
<i>Матвейчук В.И.</i> Особенности планировочной организации больших городов Беларуси и их общегородских центров .....	7
<i>Прокопов Д.Н.</i> Особенности функциональной и пространственной организации логистических комплексов.....	19

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Киселёв В.Н., Гиль А.И.</i> Практические рекомендации по проектированию уширенных центрально нагруженных фундаментов.....	23
<i>Уласик Т.М.</i> Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов .....	30
<i>Кремнёв А.П., Поляков А.Н., Гусенок К.С., Мирзаев Т.А.</i> Георадиолокационный метод контроля качества устройства цементно-грунтовых и монолитных конструкций, устраиваемых в грунте.....	34
<i>Кравцов В.Н., Якуненко С.А., Лапатин П.В.</i> Исследование вертикально армированных оснований плитных фундаментов грунтобетонными микросваями и апробация их результатов в производственных условиях .....	40
<i>Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д.</i> Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения.....	48

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Семенюк С.Д., Мельянцева И.И., Подголин А.Г.</i> Прочностные и деформативные характеристики легких бетонов на основе керамзита заводов Беларуси .....	54
<i>Давыденко Н.В., Бакатович А.А.</i> Эксплуатационные показатели и технологические особенности производства костросоломенных плит.....	61
<i>Бозылев В.В., Ягубкин А.Н.</i> Анализ изготовления блоков из модифицированного арболита в условиях опытного производства .....	66
<i>Шабанов Д.Н., Терехов С.А.</i> Моделирование структуры непрерывных волокнистых наполнителей в полимерных связующих .....	70
<i>Киреева Ю.И., Ермолаева Т.И., Кастюрина К.А.</i> Исследование механизма действия химических добавок на свойства цементных систем.....	77
<i>Шведов А.П.</i> Энергосберегающие режимы электропрогрева бетонных смесей, приготовленных с использованием активированных цементных суспензий .....	83

### ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ, ЭКОЛОГИЯ И РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

<i>Липко В.И., Лапезо А.С., Ланкович С.В.</i> Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение чердачных зданий ...	89
<i>Адамович А.Л., Лапезо А.С., Хомченко Т.А.</i> Моделирование движения воздушного потока в сушильной камере .....	98
<i>Липко В.И., Добросольцева Е.С., Синюкович Е.К.</i> Утилизация трансмиссионной теплоты при инфильтрации приточного воздуха через вентилируемые оконные стеклопакеты .....	103
<i>Спириденко Л.М., Вабищевич С.С.</i> Оценка изменения пространственного положения магистральных трубопроводов .....	109
<i>Орлов В.О., Орлова А.М., Комаровский Д.П.</i> Исследование системы аэрации воды при обезжелезивании .....	114
<i>Ющенко В.Д., Галузо А.В.</i> Характеристика и выбор реагентов для удаления соединений фосфора из сточных вод ...	121
<i>Ивашечкин В.В.</i> Технологические основы газомпульсной регенерации водозаборных скважин .....	126
<i>Комаровский Д.П., Ющенко В.Д., Моляк Т.М.</i> Коагуляционная обработка воды реки Западная Двина .....	136
<i>Грузинова В.Л., Романовский В.И.</i> Сорбционные свойства и эксплуатационные характеристики угольных волокнистых материалов .....	141

### ГЕОДЕЗИЯ И ФОТОГРАММЕТРИЯ

<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В.</i> Расчет разрешающей способности снимка.....	146
<i>Шароглазова Г.А., Товбас С.К., Маркович К.И.</i> Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе .....	153
<i>Шароглазова Г.А., Ялтыхов В.В., Маркович К.И.</i> Анализ методики обработки повторных спутниковых наблюдений на геодинимических полигонах атомных электростанций .....	156
<i>Шароглазова Г.А.</i> Детализация расположения тектонических разрывных нарушений по данным повторных геодезических измерений.....	161
<i>Дегтярёв А.М., Иваши́нёва А.С.</i> Решение задачи трансформации на плоскости с использованием многомерного распределения .....	163
<i>Ялтыхов В.В., Маркович К.И.</i> Вариации фазовых центров различных GPS-антенн. Анализ использования абсолютных и относительных калибровок антенн .....	169
<i>Крячок С.Д.</i> К вопросу определения постоянной поправки электронного дальномера в полевых условиях .....	175
<i>Маркович К.И., Валюшкин А.В.</i> Исследование особенностей визирования и измерения линий с использованием геодезических отражателей.....	181