

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

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



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

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

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия F. Строительство. Прикладные науки

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

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

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

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Адрес редакции:

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

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

Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 28.12.2018. Бумага офсетная 65 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.

Усл. печ. л. 18,83. Уч.-изд. л. 22,71. Тираж 100 экз. Заказ 700.

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.03(476.5)

АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ НАСЛЕДИЕ ГОРОДА ДИСНЫ

канд. техн. наук, доц. Р.М. ПЛАТОНОВА
(Полоцкий государственный университет»);
А.Т. ЗЕЛЕНКОВ
(«Фирма САЛЮС», Полоцк)

Рассматриваются историко-культурные и архитектурно-градостроительные вопросы возникновения и развития уникальных памятников архитектуры города Дисны: православных церквей (Воскресенской и иконы Богородицы «Одигитрия» с колокольней, Римско-католической церкви францисканцев); улочек с брусчаткой; уездного отделения Попечительства о трезвости; руин больницы; пожарной каланчи; гостиницы «Рига»; дореволюционной аптеки; столетнего моста. Установлено, что многие из обследуемых объектов отреставрированы и находятся в хорошем состоянии, но для некоторых необходимо провести реставрационные работы в полном объеме с целью их дальнейшего использования в туристических целях как источников и хранителей истории белорусского народа.

Ключевые слова: *малый город, планировка, достопримечательности, церковь, колокольня, реставрация.*

Введение. Город Дисна имеет богатую историю. Первое письменное упоминание о Дисне относится к 1461 году, но настоящим полноценным городом она стала в 1569 году, когда от Великого князя Жигимонта Августа (Sigismund August) получила свой второй герб – «Ладью», а также право на самоуправление (Магдебургское право) [1; 2]. На рубеже XIX–XX веков в городе было более 50 предприятий (кирпичных, пивоваренных, гончарных, маслобойных и т.д.), множество гостиниц, мастерских, магазинов. Это был второй по численности населения город в Полоцком районе. В 1921 году в нем проживало 11 тысяч человек, что намного больше, чем насчитывается сегодня. Практически половина из них погибли в годы Великой Отечественной войны. Сегодня Дисна – самый маленький город Беларуси, его население составляет 1,5 тысяч человек.

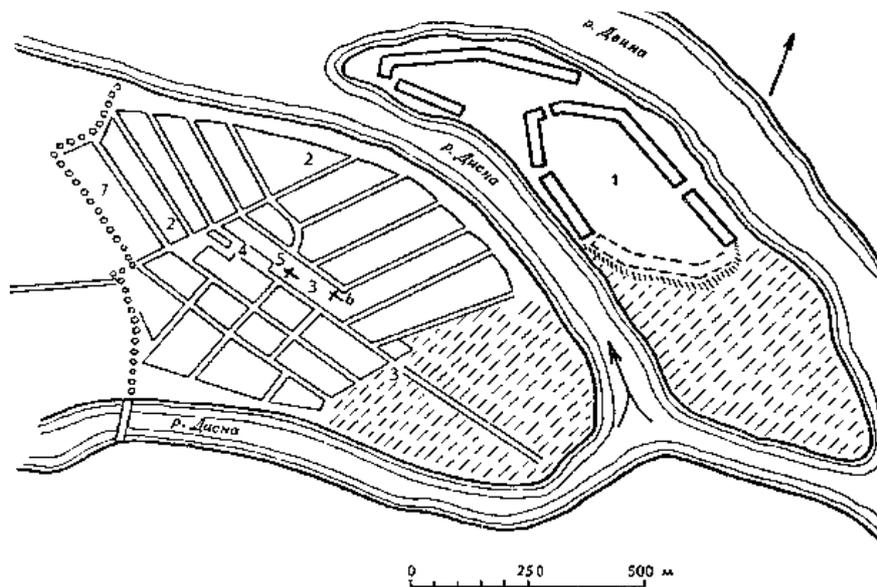
Следует отметить, что в Республике Беларусь развитию малых городов уделяется большое внимание. Беларусь – страна небольших городов. В настоящее время из 207 городских поселений 168 (или 81%) составляют малые города с численностью населения менее 20 тыс. человек. В целом в них проживает 17,1% городского населения страны.

Малые города представляют наиболее многочисленную группу городских поселений Беларуси, призваны выполнять важную и во многом специфическую миссию. Они являются источниками и хранителями истории, самобытности белорусского народа, его национальной культуры и традиций.

Одним из примеров новых подходов к активизации деятельности малых городов выступает «Стратегия устойчивого развития Дисненского края», разработанная в рамках сотрудничества с проектом Программы развития ООН «Устойчивое развитие на местном уровне».

Характерная особенность развития малых городов на современном этапе – переход от территориального роста к градостроительной реконструкции. При этом особое внимание уделяется качественному преобразованию населенных мест, совершенствованию среды жизнедеятельности населения. В связи с этим активизируются работы по градостроительной реконструкции малых городов, реновации и реставрации исторических объектов и комплексов, культовых сооружений. Большой объем работ по восстановлению историко-культурного наследия выполнен в Несвиже, Мире, Заславле, Мстиславле и других городах [3]. В Дисне, однако, аналогичные работы идут в медленном темпе. При этом необходимо подчеркнуть актуальность их проведения в полном объеме, так как Дисна – уникальный город, сочетающий дух четырех эпох: Великого Княжества Литовского, Речи Посполитой, Российской империи и межвоенной Польши. К тому же в Дисне сохранилось много достопримечательностей, среди которых такие, как: Замковый вал на острове (XVI–XVII вв.) [1; 2]; столетний мост (1906–1907 гг.); улочки с брусчаткой; Римско-католическая церковь францисканцев (1773 г.); уездное отделение Попечительства о трезвости (начало XX в.); усадьба «Дорошковичи» (XIX в.), в том числе усадебный дом и остатки хозяйственной постройки; училище (конец XIX – начало XX в.); Воскресенская церковь (1864–1870 гг.); церковь иконы Богородицы «Одигитрия» (1904 г.) с колокольней; католическое кладбище с брамой (конец XIX века); руины больницы и дореволюционные здания (начало XX века).

Основная часть. По мнению известного белорусского ученого Ю.В. Чантурия, Дисна – уникальный для Беларуси по планировочным абрисам город [4]. Дисна строилась по регулярному плану немецкого архитектора О. Хедеманна (рисунок 1) [4], её улицы практически сохранили оригинальную планировку XVI века.



1 – замок; 2 – Замоквая улица; 3 – Воскресенская улица; 4 – Рыночная площадь;
5 – Воскресенская церковь (деревянная); 6 – приходский костел; 7 – городские укрепления

Рисунок 1. – Дисна. План конца XVI века (по О. Хедеманну)

Дисна располагается на мысу при впадении одноименной реки в Западную Двину, напротив острова с замком. Специфика города заключалась в овальной конфигурации территории и наличии главной магистрали, к которой с двух сторон прилегали ряды узких удлиненных кварталов, составляя по-разному ориентированные системы направлений. В центре города находилась главная Г-образная площадь (рисунок 2).

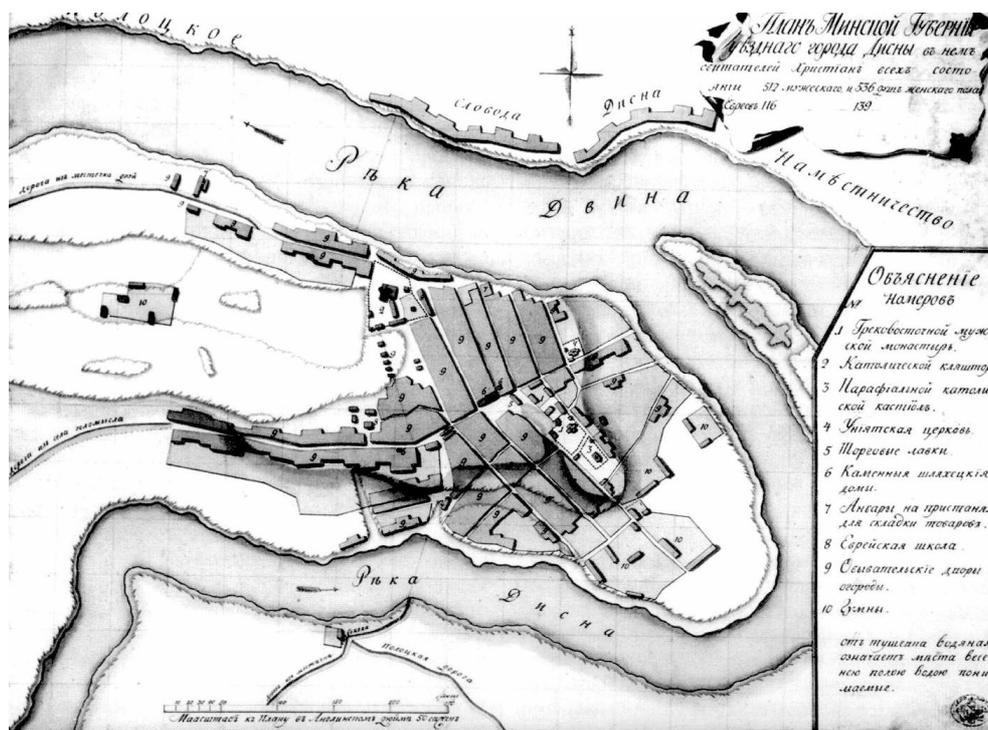


Рисунок 2. – План города Дисна конца XVIII века (РГВИА)

При рассмотрении плана Дисны конца XVIII века, представленного на рисунке 2 [4], видна сохранность первоосновы города. Две пересекающиеся под острым углом к середине города основные улицы: одна (Замковая – ныне ул. Юбилейная) направлена к Двине; другая (Воскресенская – ныне ул. Кирова) – к излучине Дисны. Вытянутые прямоугольные кварталы брали свое начало от этих двух основных улиц города. Отношение сторон рядовых кварталов принималось в пределах от 1:4,6 до 1:7,6. Вся остальная уличная сеть сложилась так, что получила ориентацию на реки, полукольцом опоясывающие Дисну.

Граница города с третьей стороны была очерчена земляным валом с деревянными башнями. Таким образом, Дисна имела достаточно внушительную фортификационную систему.

В наши дни трасса одной из главных улиц города (ул. Ленина) во многом совпадает с земляным оборонительным валом XVI века. Свое начало она берет от моста через Дисну. К улице примыкает центральная площадь с монументом В.И. Ленину. Ансамбль площади в настоящее время находится в стадии формирования (построен универмаг, разбит сквер). Вблизи площади сохранилась группа каменных жилых домов в 1–3 этажа, относящихся ко второй половине XIX – началу XX века.

Одной из основных достопримечательностей Дисны является храм Воскресения Христова, существовавший, согласно преданию, ещё в начале XIII века (рисунок 3, а). При церкви с 1633 года был монастырь. Во время опустошающего пожара 1700 года в Дисне сгорели не только все жилые дома, но и Воскресенская церковь. Уцелел только монастырь. Воскресенская церковь была отстроена заново в 1726 году на средства дисненских мещан Тимофея и Анны Бородульских. Однако этот храм также сгорел во время пожара 16 июня 1822 года. Часть его внутреннего убранства была спасена.

Существующую сегодня каменную Свято-Воскресенскую церковь построили в 1864–1870 годах на Рагушной площади – самом высоком месте в Дисне, которое никогда не затоплялось во время наводнений (рисунок 3, б). Её построили на средства, пожертвованные генерал-губернатором Виленской губернии Михаилом Муравьевым [5–7].



а



б

Рисунок 3. – Воскресенская церковь XIII век (а); начало XX века, 1903 г. (б)

При освобождении Дисны в 1944 году храм Воскресения Христова был повреждён незначительно – частично разрушена только колокольня. Храм можно было восстановить, но власти того времени не дали на это разрешения, и он был занят под заводской склад. Воскресенская церковь постепенно пришла в полное запустение: колокольня была разрушена, купол нуждался в ремонте, полов в храме не было, а кирпичная кладка повреждена.

Икону «Дисненская Одигитрия» перенесли в церковь на православном кладбище, которая была построена в 1904 году и названа в честь иконы Божьей Матери «Одигитрия» (рисунок 4, а), рядом с церковью находится колокольня начала XX века (рисунок 4, б).

Церковь дважды становилась жертвой кощунственных ограблений. Во время второго, в 1980 году, среди прочих вещей была украдена серебряная риза с чудотворной иконы. Похитив многие старинные иконы и церковную утварь, безбожники вынести чудотворную икону не смогли. «...С Неё сорвали серебряные одежды, оставив белые раны на вековом левкасе. Её бросили на пол. Пыльный след кроссовки

современного варвара запятнал одежды Богоматери... Но образ воскрес и преобразился, поправ все материальное...» – написал об этой чудотворной святыне художник-реставратор И.В. Сурмачевский, который бескорыстно отреставрировал её (рисунок 5).



а



б

Рисунок 4. – Храм в честь иконы Божьей Матери «Одигитрия» (а); колокольня (б)



а



б

а – иконостас; б – икона «Дисненская Одигитрия»

Рисунок 5. – Интерьер Храма Воскресения Христова

В 1989 году здание церкви возвратили верующим. В 1991-м после реконструкции оно было освящено (рисунок 6). Чудотворную икону перенесли в храм, где она находится и поныне.

Ежегодно 10 августа, во время праздника в честь иконы «Одигитрия», в Дисне проходят крестные ходы. Образ из Воскресенской церкви торжественно проносят через весь город к храму на кладбище, где совершают молебен. В празднике участвуют не только местные жители, но и паломники из разных стран.

Храм Воскресения Христова в Дисне относится к объектам историко-культурного наследия. Он интересен всем, кто изучает памятники архитектуры ретроспективно-русского стиля. Кроме того, храм Воскресения Христова в Дисне имеет большое значение для православного христианства как объект духовного наследия, который относится к немногому, что осталось из историко-культурного наследия города Дисны и сохранилось до наших дней. Храм был построен Стефаном Баторием по тому же форсированному плану строительства замка в 1553 году, однако в дальнейшем был разрушен.

На месте храма Воскресения Христова в Дисне в 1773 году был возведен новый храм в стиле барокко. Но и он не смог устоять и пережить вторую мировую войну – после ее окончания храму не уделялось должного внимания, и время продолжало его разрушать.



а



б

а – главный фасад; б – боковой фасад

Рисунок 6. – Храм Воскресения Христова после восстановления

Другим наиболее значимым культовым сооружением современной Дисны является Францисканский костёл непорочного зачатия Девы Марии (рисунок 7).



а



б

а – главный фасад; б – боковой фасад

Рисунок 7. – Францисканский костёл непорочного зачатия Девы Марии на довоенных фотографиях

Костел Непорочного зачатия Пресвятой Девы Марии, несомненно, уникальный памятник архитектуры конца XVIII века. Непорочное зачатие Девы Марии – католический догмат, который гласит, что Дева Мария, хоть и была зачата обычными родителями – Иоакимом и Анной, но на неё не перешел первородный грех [8].

В последнее десятилетие проводится реконструкция здания костела Непорочного зачатия Пресвятой Девы Марии (рисунок 8).

*a**б*

Рисунок 8. – Костел Непорочного зачатия Пресвятой Девы Марии до реставрации (а) и во время реставрации (б)

Как уже отмечалось выше, в Дисне известны и другие архитектурные памятники. Однако некоторые из них находятся в полуразрушенном состоянии и до сих пор не восстановлены. В частности, уездная больница (рисунок 9), расположенная на берегу реки Дисна, строительство которой велось с 1901 по 1903 год. Больница имела три отделения на сто койко-мест. Здесь лечили людей и при царской власти, и при Польше, и при Советской власти. Во время Великой отечественной войны немцы, заняв Дисну, создали здесь офицерский госпиталь. В 1944 году, во время освобождения Дисны от фашистов, после артобстрела здание больницы загорелось. Перекрытия и крыша были деревянные – в результате все выгорело. После войны больницу несколько раз пытались восстановить, но по разным причинам работы не были завершены – мы до сих пор наблюдаем её развалины времен Великой Отечественной войны.



Рисунок 9. – Уездная больница

В историческом центре Дисны находится здание бывшего уездного отделения «Общества попечительства о трезвости» конца XIX – начала XX в. (рисунок 10). До революции на первом этаже располагался буфет, на втором – клуб, на сцене которого в 1911 году выступала труппа актеров под руководством создателя профессионального национального театра Игната Буйницкого. Именно из Дисны его коллектив, в то время еще любительский, и начал гастроли по Беларуси. В советское время в этом здании был кинотеатр, позже – Дом ремесел.



Рисунок 10. – Здание бывшего уездного отделения «Общества попечительства о трезвости»

В Дисне имеется своя пожарная каланча (рисунок 11), которая была восстановлена после пожара 16 июня 1882 года, почти полностью уничтожившего город. Это было главной причиной создания в Дисне Вольного пожарного общества, которое не уступало губернскому в городе Вильно. В настоящее время в здании располагается пожарный аварийно-спасательный пост.



Рисунок 11. – Пожарная каланча

На пересечении улиц Юбилейная и Тельмана находится двухэтажное кирпичное здание гостиницы «Рига» конца XIX – начала XX века (рисунок 12).



Рисунок 12. – Здание гостиницы «Рига»

На некоторых улицах Дисны сохранилась брусчатка – «брукаванка» (рисунок 13).



Рисунок 13. – Брусчатка на улице Пушкина

Среди сохранившихся 1–3-этажных домов конца XIX – начала XX века одноэтажное кирпичное здание аптеки (рисунок 14), расположенное по улице Орджоникидзе. Обследование его деревянных перекрытий и кирпичных перегородок толщиной 120 мм проводила «Фирма САЛЮС» в 2015 году.



Рисунок 14. – Главный фасад аптеки

Результаты проведенного обследования позволили установить основные конструктивные характеристики и размеры здания аптеки, которые в плане составляли 12,3×9,6 м. Планы здания аптеки и чердачного перекрытия представлены на рисунках 15, 16.

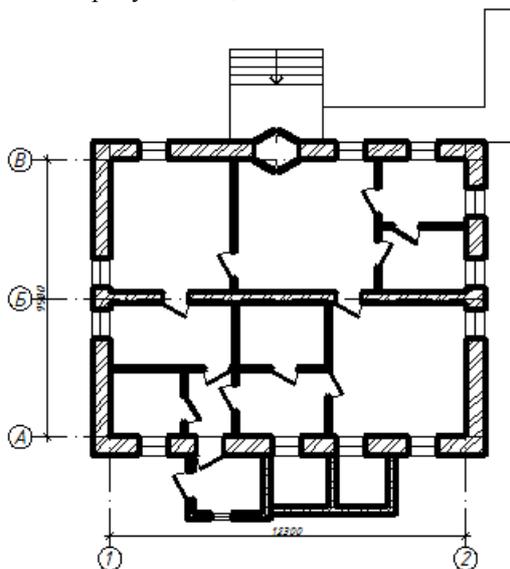


Рисунок 15. – План здания аптеки

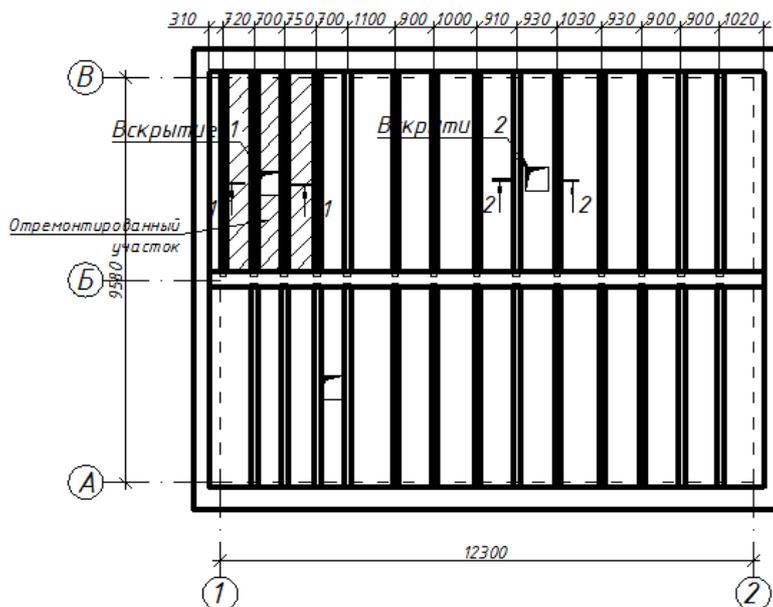
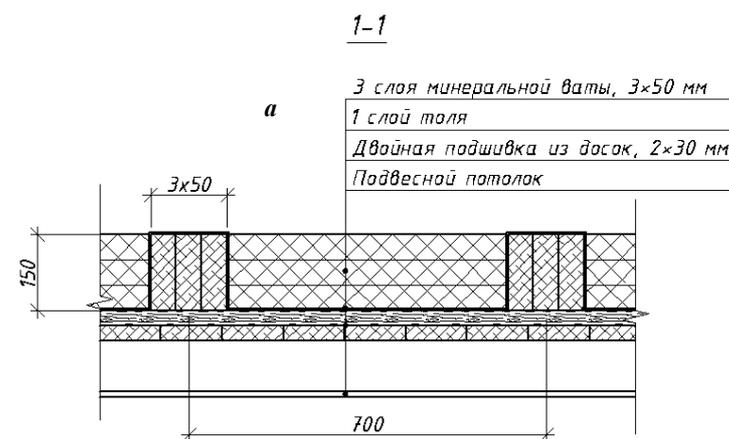
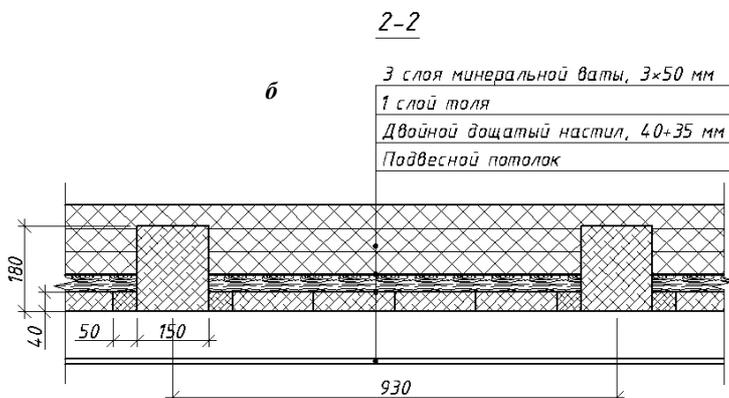


Рисунок 16. – План чердачного перекрытия

Разрезы чердачного перекрытия 1-1 (а) и 2-2 (б) представлены на рисунке 17.



а – разрез чердачного перекрытия 1-1



б – разрез чердачного перекрытия 2-2

Рисунок 17. – Разрезы чердачного перекрытия

Крыша аптеки с холодным чердаком и деревянной стропильной системой. Покрытие – из кровельной листовой стали.

Чердачное перекрытие деревянное и состоит из балок с черепными брусками, по которым уложены щиты настила. Балки перекрытия опираются на наружные и внутренние несущие стены. Шаг балок составляет 0,7...0,9 м.

Настил выполнен двойным из досок толщиной 40 и 35 мм.

На участке примерно 3,2 м у оси 1 в осях Б–В выполнен ремонт чердачного перекрытия с заменой балок. Утеплитель – минеральная вата (толщиной 150 мм).

Обследование и поверочный расчет показали следующее:

- деревянные конструкции чердачного перекрытия и утеплитель из минераловатных плит находятся в удовлетворительном состоянии;
- несущая способность деревянных балок на действующие нагрузки обеспечена;
- кирпичные перегородки в результате неравномерных осадок основания имеют наклонные трещины.

На основании проведенного обследования и выполненного поверочного расчета даны рекомендации по ремонту кирпичных перегородок.

Заметим, что в Дисне первая аптека появилась в 1840 году [9].

В пределах города берега реки Дисна соединяет автомобильный мост. Утверждается, что он самый старый в Беларуси – ему более 100 лет (1906–1907 гг.). Это уникальный арочный мост с деревянным покрытием на металлических и каменных основах.

После Второй мировой войны поврежденный пролет моста заменили на трофейный, из Германии, но он был другой конструкции. В 2002 году мост капитально отремонтировали (рисунок 18).



Рисунок 18. – Мост через реку Дисна

Выводы. Анализ и обследование архитектурных и градостроительных памятников, историко-культурных ценностей города Дисны Миорского района проводились в соответствии с госбюджетной научно-исследовательской работой кафедры «Архитектура» учреждения образования «Полоцкий государственный университет»: «Проблемы и тенденции архитектуры Белорусского Подвинья» (зарегистрирована в БелИСА, № госрегистрации 20164057 от 28.10.2016 г.).

Отметим, что в Миорском районе в целом и Дисне в частности имеются и другие объекты, которые являются интересными туристическими и важными архитектурными достопримечательностями Беларуси. Некоторые из них были исследованы ранее [10], а другие предстоит исследовать в ближайшие годы.

Местные власти инициируют работу в этом направлении. Так, в начале 2018 года разработан «План мероприятий по развитию туризма в городе Дисна»; для повышения туристической привлекательности предпринимаются меры по включению новых объектов города в Государственный список историко-культурных ценностей. В частности, направлено Письмо в Институт истории НАН Беларуси по предоставлению материалов по вопросу включения в Государственный список историко-культурных ценностей Республики Беларусь островного замка Стефана Батория и костела Непорочного Зачатия Девы Марии после его реставрации. Из имеющихся в настоящее время на территории города зданий и сооружений в Государственный список историко-культурных ценностей включена только церковь Воскресения Христова.

Таким образом, на примере исследования архитектурно-градостроительных памятников города Дисны можно сделать следующие **выводы**:

- многие из обследуемых объектов, в частности храмы, отреставрированы или в настоящее время проводятся работы по их реставрации;

- необходимо продолжить изучение исторического и архитектурного наследия малых городов и поселков Белорусского Подвинья;
- требуется охрана и реставрация сооружений с целью их дальнейшего использования в туристических целях;
- следует провести в полном объеме реставрационные работы архитектурно-исторических объектов города Дисны, которые находятся в неудовлетворительном состоянии и нуждаются в срочных восстановительных работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Платонова, Р.М. Дисненский замок / Р.М. Платонова, // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : республ. науч.-практ. семинар, Новополоцк. – Новополоцк : ПГУ, 2018. – С. 109–112.
2. Yaustratava, P. Castle in Disna / P. Yaustratava, A. Kulakova, R. Platonava // European & national dimension in research : Electronic collected materials of IX Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, 10–12 May 2018. – P. 55–58.
3. Ничкасов А. Малые города Беларуси: прошлое, настоящее, будущее [Электронный ресурс] / А. Ничкасов, Э. Клевко. – Режим доступа: <http://ais.by/story/1391>. – Дата доступа: 24.03.2008.
4. Чантурия, Е.В. Градостроительное искусство Беларуси второй половины XVI – первой половины XIX в. : Средневековое наследие. Ренессанс, барокко, классицизм / Ю.В. Чантурия. – Минск : Беларус. наука, 2005. – С. 117–118.
5. Дыбовский, А. История Дисны / А. Дыбовский // Дисна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://globus.tut.by/disna/index.htm>. – Дата доступа: 22.01.2017.
6. Kulakova, A. The church of the resurrection of christ in the city of Dzisna / A. Kulakova, P. Yaustratava, R. Platonava // European & national dimension in research: Electronic collected materials of IX Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, 10–12 May 2018. – P. 15–17.
7. Матвеев, Г. История храма Воскресения Христова г. Дисна [Электронный ресурс] / Г. Матвеев // Храмы Миоры. – 2015. – Режим доступа: <http://www.radzima.org/ru/object-photo/4957.html>. – Дата доступа: 21.01.2017.
8. Дыбовский, А. Дисна, костел Непорочного Зачатия Девы Марии / А. Дыбовский // Витебская область, Миорский район [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://orda.of.by/.add/gallery.php?disna/kostel>. – Дата доступа: 21.01.2017.
9. Эльяшевич, Е.Г. Возникновение первых аптек в восточной части территории Республики Беларусь в дореволюционный период (XII–XIX вв.) / Е.Г. Эльяшевич, В.В. Кугач // Вестник фармации. – 2008. – № 3 (41). – С. 108–112.
10. Платонова, Р.М. Усадьба Рудницких в Миорском районе / Р.М. Платонова, М.А. Платонова // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. 19 междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 23–25 окт. 2014 г. – Брест : БГТУ, 2014. – С. 5–8.

Поступила 20.12.2018

ARCHITECTURAL TOWN-PLANNING HERITAGE TOWN OF DISNA

R. PLATONOVA, A. ZELENKOV

The article examines the historical-cultural and architectural and urbanistic questions arose-occurrence and development of the unique monuments of the town of Disna: Orthodox Churches-Resurrection and the Virgin Hodegetria “icons” with a Bell Tower, the Roman Catholic Church of Franciscan, streets with pavement, the County Guardianship Office on sobriety, the ruins of the hospital, fire Tower, the hotel “Riga”, pre-revolutionary pharmacies, hundred-year-old bridge. Found that many of the surveyed objects have been restored and are in good condition, but for some it is necessary to carry out restoration work in its entirety with a view to their further use for tourism purposes.

Keywords: *small town, planning, sights, Church, bell tower, restoration.*

УДК 69.036(476)

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Е.Г. БРЯНЦЕВ; канд. техн. наук **Д.Н. ШАБАНОВ;** **А.Н. ЯГУБКИН**
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается проблема несоответствия современным требованиям архитектурных решений, используемых в настоящее время при проектировании крупнопанельных жилых зданий. Выявлены внешние (ограничивающие) и внутренние (целевые) факторы, влияющие на выбор объемно-планировочных и конструктивных решений при проектировании крупнопанельных жилых зданий. Систематизированы основные требования и критерии к их проектированию и строительству. На основе заданных критериев для выбора наиболее оптимального варианта компоновки жилых зданий предложено использование принципов открытой системы типизации, намечены пути уменьшения материалоемкости, трудоемкости, теплопотерь, себестоимости и улучшения комфорта проживания. Рассмотрены вопросы конструирования несущего каркаса и наружных панелей. Представлены разработанные наиболее экономичные варианты объемно-планировочных и конструктивных решений крупнопанельных жилых зданий для новой серии.

Ключевые слова: объемно-планировочное решение, конструктивное решение, проектирование жилых зданий, системы типизации, крупнопанельные жилые здания.

Введение. Благодаря использованию в массовом строительстве индустриальных жилых домов в Республике Беларусь за довольно короткий период был преодолен острый жилищный кризис. Однако из-за крайне ограниченных технических и экономических возможностей, а также пренебрежения ради упрощенчества архитектурной проработкой дома (особенно периода 1958–1963 годов) получались явно некомфортными и непривлекательными. Некоторое усовершенствование конструктивных и планировочных решений в последующих разработках (в домах второго поколения) не коснулось их архитектурного облика. Одинаковые по своей объемной форме (параллелепипед) и почти идентичной, независимо от конструктивных решений, архитектуры фасадов многочисленные здания оказали существенное отрицательное влияние на облик белорусских городов. Однако и в настоящее время архитектурные решения не соответствуют современным требованиям (рисунок 1).

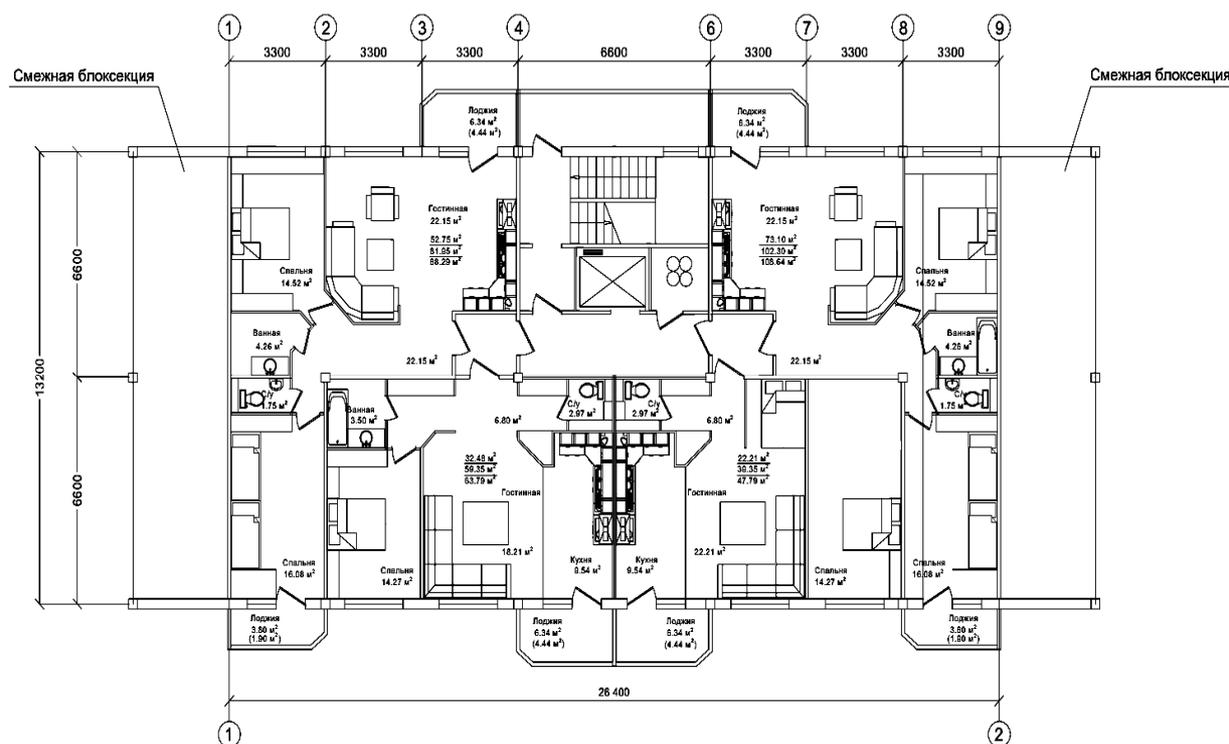


Рисунок 1. – План типового этажа 90 серии

Таким образом, исходя из сказанного выше, можно заключить, что при проектировании жилых зданий необходимо принимать во внимание следующее:

- 1) создание энергоэффективных наружных стен;
- 2) увеличение площадей комнат, прихожих, кухонь, санузлов, а следовательно и площади квартиры в целом;
- 3) изменение номенклатуры квартир;
- 4) приведение этих зданий в соответствие с современными требованиями инженерного оборудования (шумо- и звукоизоляция, автоматизация).

Немаловажную роль при этом будет играть улучшение архитектурного облика крупнопанельных жилых зданий – придание им индивидуальности.

В последние годы всё большую активность в мире приобретает зелёное строительство (Green Building). Ряд стран уже вводят экологические стандарты по проектированию и строительству. На первый план всё чаще выходят такие показатели, как: экологичность, экономичность, энергоэффективность, обеспечение здорового образа жизни и комфортности.

Решение задачи по обеспечению каждой семьи квартирой, отвечающей современным требованиям (соответствующим социальным, демографическим запросам и нормативам комфортности), в условиях строгого дефицита территорий и финансовых возможностей потребует значительных усилий по *разработке новых серий крупнопанельных жилых зданий*.

Основная часть. При проектировании крупнопанельных жилых зданий должны учитываться решения, принятые в схемах и проектах районной планировки, а также в проектах планировки и застройки городов. Предполагается, что важнейшим направлением в проектировании крупнопанельных жилых зданий должна стать максимальная унификация конструкций и изделий, выпускаемых заводами КПД, а также широкое применение типовых проектных решений на основе главных принципов, сформулированных еще в конце XX века [1–14].

Систематизируя запросы инвесторов, можно резюмировать, что проектировщиками в процессе разработки проектов крупнопанельных зданий приходится определять их конфигурацию и размеры с учетом требуемого набора и количества квартир, вписывая здания в конкретные участки, поэтому необходимо иметь достаточно широкий перечень типовых и повторно-применяемых секций. Это возможно при условии применения основных принципов так называемой открытой системы типизации, когда из весьма ограниченного количества типоразмеров заводских изделий можно собирать практически неограниченные по вариативности индивидуальные жилые дома с любой планировкой и этажностью. В этом коренное отличие до сих пор применявшихся повсеместно проектов крупнопанельных домов с закрытой системой типизации, в которой при огромном количестве типоразмеров изделий возможно строительство ограниченного количества жилых секций.

Концепция открытой технологической системы в крупнопанельном домостроении [1]

Первый принцип. Любое композиционное решение обеспечивается необходимыми строительными элементами минимальной номенклатуры (на порядок меньше номенклатуры закрытой технологической системы КПД).

Второй принцип. Конструктивное решение позволяет применить данный строительный элемент на любом месте и его точное местоположение определяется в процессе монтажа.

Третий принцип. Независимое расположение соединений элементов в пространстве во взаимосвязи с линиями укрупненной конструктивной модульной сетки.

Четвертый принцип. Не требуются рабочие чертежи для всех возможных марок элементов; достаточно, чтобы в каталоге были сведения для формирования кода элемента в зависимости от вида и местоположения проемов, что значительно упрощает проектирование, производство и монтаж.

Пятый принцип. Отверстия для прохода инженерных сетей создаются в процессе монтажа, чтобы не увеличивать количество марок изделий.

Таким образом, основное преимущество открытой системы типизации заключается в том, что из небольшого количества изделий (буквально несколько десятков) можно строить индивидуальные жилые дома любого объемно-планировочного решения, при этом легко осуществляя переход от выпускаемой продукции к совершенно новой. В то же время возможно в несколько раз снизить себестоимость строительства за счет более продуманного и маломатериалоемкого конструктивного решения, что позволит в несколько раз уменьшить трудоемкость монтажа и при этом повысить комфортность проживания, в полной мере применяя принципы совершенно свободной и вариативной планировки квартир, ориентируясь на индивидуальные вкусы конкретных семей.

Особенности архитектурного решения. В процессе проектирования крупнопанельных жилых зданий архитекторы сталкиваются с большим числом противоречий, в частности с необходимостью соз-

дания интересного внешнего облика здания с чисто утилитарными требованиями по максимальному ограничению теплопотерь, что диктует компактную схему с минимальным периметром наружных стен. Решение здесь находится в разумном сочетании основного прямоугольного объема с достаточно широким корпусом и разнообразными по планировке и конфигурации летними (неотапливаемыми) помещениями, неповторяющимся архитектурным обликом с применением различной наружной отделки по фактуре и цвету. Возможно активное применение остекленных и неостекленных лоджий, веранд, зимних садов, солнечных вегетариев, витрин встроенных помещений и других многообразных архитектурных элементов. Что касается внутренней планировки, то здесь появляется огромный фронт действительно многообразных решений, позволяющих в зависимости от временного роста (пульсирования) и схлопывания конкретной семьи (появление детей, их рост по возрасту и перспективный уход с образованием своих семей) осуществлять соответствующие дизайнерские приемы по мере изменения потребностей каждой семьи. Большое значение в предлагаемом решении имеет возврат к необходимой высоте жилых помещений, равной нормативной высоте помещений общественных зданий, то есть не менее трех метров от пола до потолка, что соответствует необходимым санитарно-гигиеническим требованиям.

На протяжении примерно семидесятилетнего срока жилье в Беларуси возводилось вопреки стремлению человека к здоровому и устойчивому образу жизни. Недостаточный объем воздуха и его неправильный обмен, вызванный слишком малой высотой жилых помещений, пагубно сказывается на здоровье жильцов. К тому же процессы приготовления пищи в таких условиях – с использованием почти повсеместно газовых плит и поквартирного газового отопления – можно приравнять к промышленным технологиям «вредных» производств.

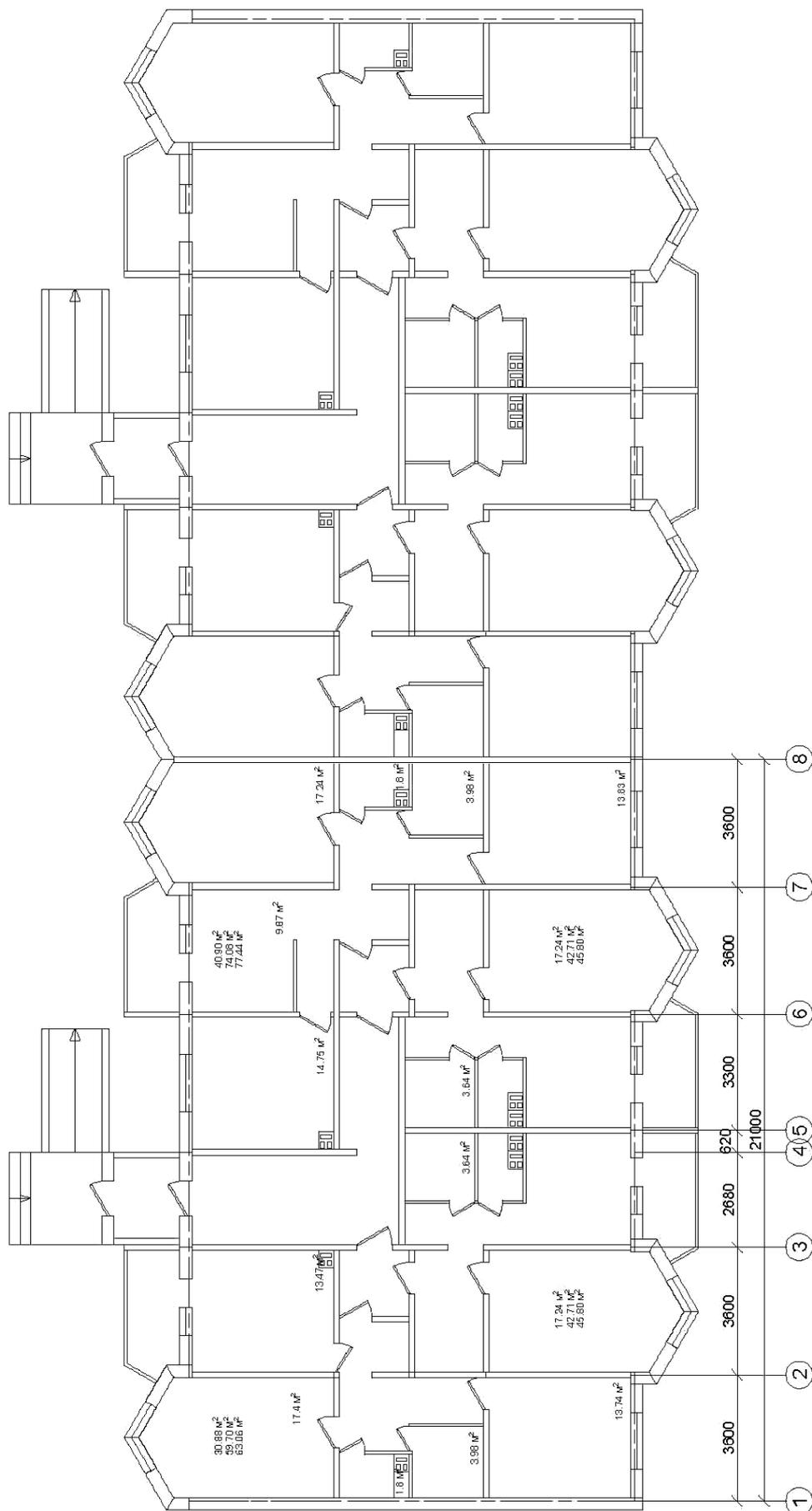
Согласно исследованиям российского ученого Ю.Д. Губернского, частота детской заболеваемости и длительность болезней существенно выше в семьях, проживающих в газифицированных жилищах, нежели в квартирах, оснащенных электрическими кухонными плитами. Газовые нагревательные приборы характеризуются ещё и тем, что непосредственно выделяют при работе опасные для здоровья вещества (угарный газ), субстанции, не являющиеся собственно токсинами, но представляющие собой своеобразные катализаторы для других токсинов, а также усиливающие иммунодефицит.

Газовая аппаратура также ухудшает физические характеристики жилой среды – температурно-влажностный режим, уровень и структуру ионизации воздуха. Речь идет о постепенном, хроническом отравлении организма человека, которое сопровождается плохим самочувствием, но не доходит до острых ситуаций. Все это существенно сокращает продолжительность жизни. Кроме этого в последнее время участились случаи гибели людей от взрыва бытового газа. В силу некоторых постановлений Совета Министров Республики Беларусь необходимо планомерно и повсеместно прекратить использование бытового газа и заменить его и для бытовых нужд и отопления электрической энергией, учитывая вновь вводимую Белорусскую АЭС.

В результате исключения применения газового оборудования возможно применение, разрешенное действующими строительными и санитарными нормами планировочных решений с объединением кухни, столовой, гостиной и прихожей в единое пространство, что существенно улучшит комфорт квартиры и позволит значительно уменьшить количество перегородок и дверных проемов, что также скажется на материалоёмкости и трудоёмкости монтажа и позволит снизить стоимость квадратного метра жилья.

Конструктивные особенности новой системы. Согласно документу «Основные направления реконструкции предприятий крупнопанельного домостроения в Республике Беларусь», разработанном «Институтом НИПТИС им. Атаева С.С.» по заданию Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, намечены четыре варианта перепрофилирования действующих предприятий КПД. Второй вариант представляется наиболее подходящим для Треста № 16 (Новополоцк), завода КПД – это выпуск ширококорпусных жилых домов с гибкой планировкой квартир со смешанной каркасно-стеновой конструктивной системой (рисунок 2).

По представленной конструктивной системе основными вертикальными несущими элементами являются: колонны, наружные стеновые панели и панели внутренних стен, образующие лестничный и лестнично-лифтовой узел. Горизонтальные несущие элементы – плоские сплошные плиты перекрытий КПД либо многопустотные панели перекрытий (как вариант с использованием каркаса, разработанного «Институтом Минскпромпроект»), опирающиеся на панели наружных стен и одноэтажные колонны в середине здания или на ригель, не выступающий из плоскости потолка. Шаг колонн и модульный размер наружных и внутренних стеновых панелей предлагается унифицировать к единому укрупненному модулю 6М, то есть 6,6 м, сократив тем самым количество стыков, особенно наружных (в три раза на одну жилую секцию). Это позволит существенно снизить теплопотери через указанные стыки, которые до сих пор являются уязвимым местом всех современных зданий крупнопанельного домостроения, и соответственно уменьшить трудоёмкость строймонтажа.



- 1. жилая площадь – 106,26 м²; 2. общая площадь без лоджий – 219,2 м²; 3. общая площадь с лоджиями – 232,1 м²; 4. периметр наружных стен – 50 пог. м; 5. количество стыков – 24 шт.; 6. общая площадь на погонный метр стены – 4,314 м²; 7. коэффициент К1 – 0,484; 8. коэффициент К2 – 3,700; стоимость 1 м² общей площади – 500 у.е.

Осваиваемая в Новополоцке серия М464 (традиционная закрытая технологическая система)
 Разработка «Минспроекстрой» для СУ № 205 ОАО «МАПИД»

Рисунок 2. – План типового этажа, осваиваемый в Тресте № 16, Новополоцк

В данном варианте каркаса полностью используются панели наружных стен, плоские плиты перекрытия с измененным армированием, частично – панели внутренних стен для лестничных клеток с внесенными изменениями по новым нормативным требованиям, элементы лестниц с площадками и лифтами. Новым конструктивным элементом служит одноэтажная бесконсольная колонна. Перегородки по индивидуальному дизайнерскому проекту могут выполняться из различных легких материалов (ячеистый бетон, гипсокартон (ГКЛ и ГВЛ), стекломагнолист, пенобетон и др.).

В такой новой конструктивной системе можно решать вопросы энергосбережения, о которой будет сказано ниже. Переход от строительства по закрытой системе к открытой технологической системе возможно осуществить без остановки производства, продолжая вести строительство по двум системам одновременно. Все это позволит производству работать «на склад» и комплектовать строительство гибко на заказ.

Инженерное обеспечение. К современным инженерным системам нормативная база относит: отопление с регулируемым температурным режимом; вентиляцию; пожарную сигнализацию и автоматическую систему пожаротушения; охранную сигнализацию и систему видеонаблюдения; наличие оптоволоконных телекоммуникаций; водоснабжение; канализацию; электроснабжение.

К вопросу отопления и вентиляции необходимо подходить комплексно, учитывая все факторы, влияющие на комфорт проживания. *Во-первых*, следует создать такую конструкцию всего обогреваемого контура здания, которая обеспечивала бы минимальные теплопотери с коэффициентом сопротивления теплопередаче, принятым в европейских странах (от 6 до 10 включительно). *Во-вторых*, необходимо принять наиболее современную систему поквартирного отопления, в качестве которой предлагается лучистая система электрического отопления с использованием пленочных лучистых электронагревателей (ПЛЭН) [2]. В основу работы нагревателя заложен известный принцип: при протекании тока через проводник (резистивную греющую алюминиевую фольгу) выделяется теплота в виде инфракрасных лучей длиной волны 9...15 мкм. Данное излучение поглощается поверхностью стен, пола и мебели, создавая при этом комфортный обогрев помещения. Коэффициент полезного действия ПЛЭН составляет 95%, что исключает заморозку и разморозку системы; минимальное снижение затрат на отопление – до 2,5 раз. Температура регулируется комнатным терморегулятором. Система работает по 10 мин в час при этом на обогрев 1 м² помещения затрачивается около 10...15 Вт в час. Такая система не требует регулярного техобслуживания, обеспечивает комфортность проживания и абсолютно безопасна, может монтироваться в полу, на потолке и внутренних стенах.

Что касается конструкции наружных стен, то, согласно данным исследований российских ученых Б.В. Гусева и В.М. Дементьева [3], необходимо создать модель идеальной стены, которая может быть создана на основе жилой системы под названием «русская изба». Используя открытые Б.В. Гусевым и В.М. Дементьевым закономерности и имея в своем распоряжении соответствующие материалы, можно построить жилые помещения, приближающиеся к условиям идеальной комфортности.

Как считают Б.В. Гусев и В.М. Дементьев, удаление антропоксинов и других загрязнителей – основная проблема комфортности. Для того чтобы их удалить, требуется обязательный полный воздухообмен. Поэтому внутреннюю часть стены нужно делать из фильтрующих материалов, в которой воздухообмен осуществляется по схеме полного вытеснения, когда нулевая концентрация вредных веществ достигается однократным воздухообменом. При этом предлагается для исключения лишних теплопотерь применять вместо любых утеплителей алюминиевую фольгу, которая, как известно, отражает до 97% лучистого тепла обратно в помещение, учитывая предлагаемое лучистое тепло для отопления. Такая конструкция наружной стены (рисунок 3) позволит уменьшить теплопотери примерно в 3 раза.

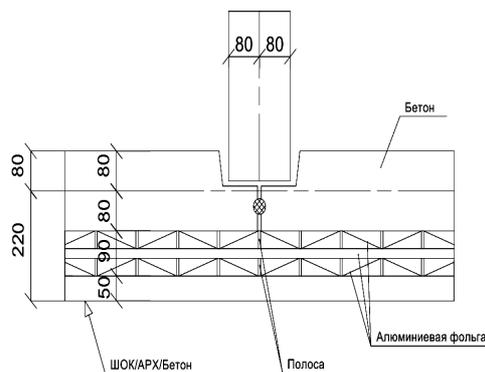


Рисунок 3. – Конструкция предлагаемой стены

Заключение. В результате проведенного исследования подходов в проектировании крупнопанельных жилых зданий с целью типизации решений, возможности повторного применения проектных решений, рационализации процесса выбора вариантов разработаны наиболее экономичные варианты объемно-планировочных и конструктивных решений крупнопанельных жилых зданий для новой серии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирчев, С.Р. Открытые технологические системы в крупнопанельном домостроении / С.Р. Мирчев. – М. : Стройиздат, 1984. – 39 с.
2. Бадьин, Г.М. Современные технологии строительства и реконструкции зданий / Г.М. Бадьин, С.А. Сычев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2013. – 128 с.
3. Гусев, Б.В. Об идеальной комфортности жилища / Б.В. Гусев, В.М. Дементьев // Строительные материалы. – 1999. – № 121. – С. 24–25.
4. Уланов, Л.Н. Что делать с пятиэтажками? / Л.Н. Уланов // Жилищное строительство. – 2001. – № 3. – С. 12–14.
5. Шевчук, Л.И. Проблемы архитектурно-строительной политики / Л.И. Шевчук // Строительный экспорт. – 1999. – № 8. – С. 8–12.
6. Шагин, А.Л. Реконструкция зданий и сооружений / А.Л. Шагин. – М. : Высш. школа, 1991. – 252 с.
7. Шепелев, Н.П. Реконструкция городской застройки / Н.П. Шепелев, М.С. Шумилов. – М. : Высш. школа, 2000. – 271 с.
8. Недвижимость за рубежом [Электронный ресурс] / В Великобритании построили дом-скворечник. – Режим доступа: <http://prian.ru/news/16302.html>. – Дата доступа: 19.11.2018.
9. Kevern, T.T. Effects of macrosynthetic fibers on pervious concrete properties / T.T. Kevern, D. Biddle, Q. Cao // J Mater. Civ. Eng. – 2015. – № 27. – P. 9.
10. Справочник по композиционным материалам : в 2-х кн. ; под ред. Дж. Любина. – М. : Машиностроение, 1988. – 448 с.
11. Green Awards [Электронный ресурс] // Экологический стандарт BREEAM. – Режим доступа: <http://www.greenawards.ru/ru/green-awards-history/green>. – Дата доступа: 19.11.2018.
12. Журнал «Архитектура и строительство» [Электронный ресурс] // Зелёное строительство. – Режим доступа: <http://ais.by/article/zelenoe-stroitelstvo>. – Дата доступа: 19.11.2018.
13. Медицинский форум [Электронный ресурс] // Высота и здоровье. – Режим доступа: <https://www.medikforum.ru/medicine/61010-zhit-vyshe-7-etazha-opasno-dlya-zdorovya.html>. – Дата доступа: 19.11.2018.
14. Modeling the effects of biological tissue on RF propagation from a wrist-worn device / J.D. Wilson [et al.] // 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 2014. – P. 3146–3149.

Поступила 21.12.2018

TO THE QUESTION OF THE CHOICE OF OPTIONS OF VOLUME-PLANNING AND CONSTRUCTION DECISIONS WHEN DESIGNING LARGE PANEL RESIDENTIAL BUILDINGS

E. BRYANTSEV, D. SHABANOV, A. YAGUBKIN

It is shown that at present the architectural solutions used in the design of large-panel residential buildings in the Republic of Belarus do not meet modern requirements. External (limiting) and internal (target) factors influencing the choice of space-planning and design solutions in the design of large-panel residential buildings are identified. The main requirements and criteria for their design and construction are systematized. On the basis of the given criteria for choosing the most optimal layout of residential buildings, it was proposed to use the principles of an open typing system, and ways to reduce it were outlined: material intensity, labor intensity, heat loss, cost, and improvement of living comfort. Considered the design of the supporting frame and exterior panels. The most economical variants of space-planning and design solutions for large-panel residential buildings for the new series are presented.

Keywords: *space planning solution, constructive solution, design of residential buildings, typing systems, large-panel residential buildings.*

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.044:624.012.4

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ «РАСПОРКИ И ТЯЖИ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

О.Г. САННИКОВА; д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР
(Брестский государственный технический университет)

На основании анализа зарубежных нормативных документов рассмотрены основные положения модели «Распорки и тяжи» («Strut-and-ties» model) для определения сопротивления срезу железобетонных элементов. Обобщены основные требования к конструированию и определению сопротивления сжатых и растянутых элементов модели. Рассмотрены различные подходы к определению сопротивления сжатых элементов модели с учетом коэффициента разупрочнения бетона.

Ключевые слова: железобетонные элементы, модель ферменной аналогии, сопротивление срезу, разупрочнение бетона, анкеровка арматуры.

Введение. Модель ферменной аналогии остается одним из наиболее доступных для понимания и простых в реализации методов расчета железобетонных элементов на срез [1–6]. Идеализация железобетонного элемента с трещинами в виде фермы с параллельными поясами основана на характерной системе сжатых и растянутых полей напряжений, возникающих вследствие внешнего воздействия. Однако, основываясь на гипотезе плоских сечений, модель ферменной аналогии определяет сопротивление поперечной силе, полагая равномерное распределение сжимающих и растягивающих напряжений по всему конструктивному элементу. При этом в рамках модели ферменной аналогии отдельно не рассмотрены части конструктивного элемента, в которых вследствие геометрической или статической неоднородности возникает неравномерное распределение напряжений, что, в свою очередь, искажает результаты расчета [7]. Кроме этого, классическая модель не учитывает появление пластических деформаций при работе элемента с трещинами, что ограничивает область применения данной модели.

Появление теории пластичности [8] позволило сформулировать положения усовершенствованной модели ферменной аналогии – модели «Распорки и тяжи» («Strut-and-ties» model) – для случая расчета на срез областей с неравномерным распределением напряжений. Следует отметить, что положения усовершенствованной модели «Распорки и тяжи», разработанные в первую очередь для расчета на действие поперечных сил областей с неравномерным распределением напряжений, не противоречат положениям классической модели ферменной аналогии и могут быть применимы для расчета на срез всего конструктивного элемента. В международной терминологии области с равномерным распределением напряжений классифицируют как *B*-области, а с неравномерным распределением напряжений – как *D*-области (рисунок 1).

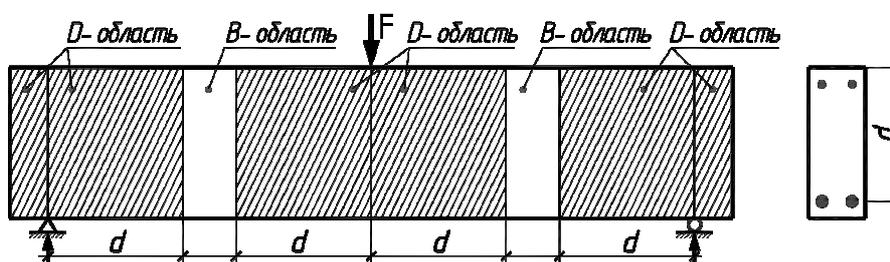


Рисунок 1. – Общий вид однопролетной железобетонной балки с выделением *B*- и *D*-областей

Границы *D*-областей с неравномерным распределением напряжений определяются на основании принципа Сен-Венана (рисунок 2, *а*), в соответствии с которым линейное распределение напряжений наблюдается на расстоянии, равном одной высоте сечения от точки приложения сосредоточенной силы (опорной реакции) или от места геометрической неоднородности, например, места изменения высоты сечения, расположения отверстия (рисунок 2, *б–ж*). В некоторых случаях, в частности в случае коротких балок, весь конструктивный элемент может представлять собой *D*-область (рисунок 2, *ж*).

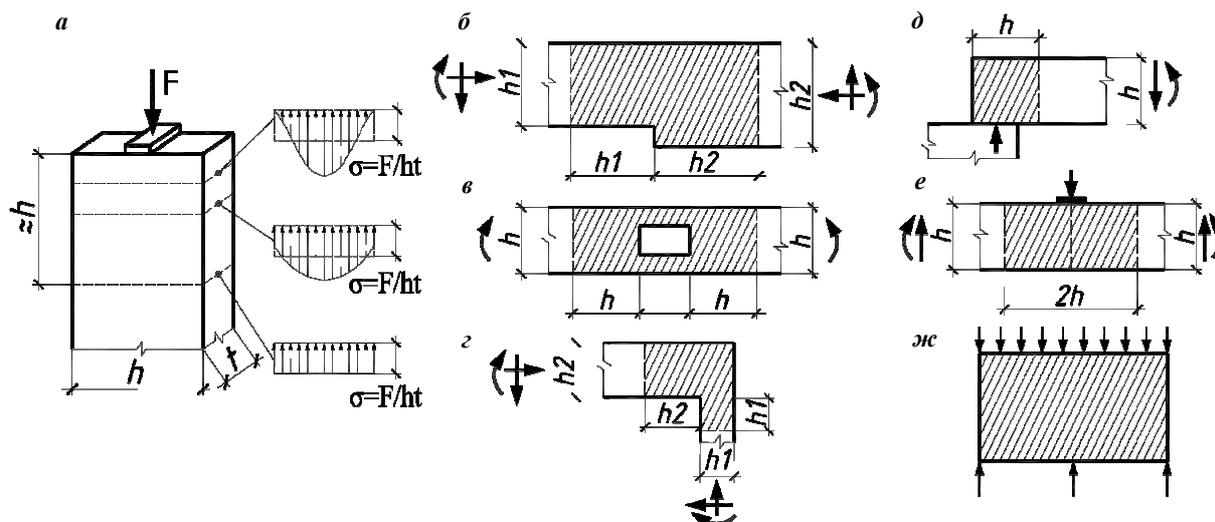
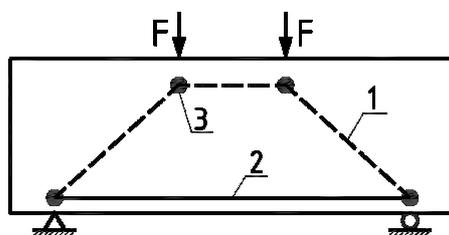


Рисунок 2. – Действие принципа Сен-Венана [9] (а) при определении D -областей с геометрической (б-г) и статической (д-ж) неоднородностью [10]

Следует отметить значительный интерес к модели «Распорки и тяжи» со стороны ведущих зарубежных научных школ, о чем свидетельствует не только принятие его в нормативных документах [10–13], но и непрерывное совершенствование основных положений по расчету, отражающееся в новых версиях отмеченных норм [13; 14].

Общие положения модели «Распорки и тяжи». Модель «Распорки и тяжи» основана на действительной физической модели железобетонного конструктивного элемента под нагрузкой, в соответствии с которой последний в условиях нагружения может быть представлен в виде системы сжатых полей в бетоне и растянутых полей в бетоне и арматуре. Основными элементами модели «Распорки и тяжи» являются: 1) распорки (struts), которые представляют собой равнодействующие сжимающих напряжений; 2) тяжи (ties) как равнодействующие растягивающих напряжений; 3) узловые элементы (nodes), которые являются пересечением распорок и тяжей, где происходит перераспределение напряжений (рисунок 3).



1 – центрально сжатая распорка;
2 – центрально растянутый тяж;
3 – узловой элемент

Рисунок 3. – Общий вид составляющих элементов модели «Распорки и тяжи»

Основные положения модели «Распорки и тяжи» базируются на следующих допущениях:

- геометрические параметры модели определяются исходя из действительной системы полей напряжений в упругой стадии работы конструктивного элемента;
- усилия в сжатых и растянутых элементах модели определяются на основании статической схемы расчета конструктивного элемента;
- расчет сжатых и растянутых элементов на прочность выполняется в соответствии с положениями теории пластичности.

Следует отметить, что рассматриваемая модель, в первую очередь, применяется для расчета новых и существующих железобетонных и предварительно напряженных железобетонных конструктивных элементов по первой группе предельных состояний. В то же время в некоторых исследованиях [7] и нормативных документах [11; 13] отмечается возможность расчета конструктивных элементов на основании данной модели и по второй группе предельных состояний, однако конкретные положения по расчету элементов в эксплуатационный период в отмеченных работах отсутствуют.

В общем случае на основании [7; 11; 12] порядок расчета железобетонных и предварительно напряженных железобетонных элементов в областях с неоднородным распределением напряжений может быть представлен в виде поэтапно выполняемых действий.

Этап 1. Выделение в конструктивном элементе областей с однородным (*B*-области) и неоднородным (*D*-области) распределением напряжений в соответствии с принципом Сен-Венана.

Этап 2. Определение всех действующих на конструктивный элемент нагрузок, а также опорных реакций. При этом, как отмечается в работе [15], моменты должны быть представлены в виде пары сил; сосредоточенные силы, действующие на незначительном расстоянии друг от друга, должны быть рассмотрены совместно; распределенные нагрузки должны быть представлены в виде системы сосредоточенных сил.

Этап 3. Анализ взаимодействия (анализ граничных условий) структурных компонентов (*B*-областей и *D*-областей), составляющих конструктивный элемент. Такой анализ выполняется в том случае, когда только часть (*D*-область) конструктивного элемента рассчитывается на основании модели «Распорки и тяжи», а действие *B*-области заменяют соответствующими усилиями.

Этап 4. Определение предварительных геометрических параметров конструктивного элемента на основании расчета предельной поперечной силы, при которой образуются диагональные трещины в эксплуатационный период (shear serviceability check).

Этап 5. Разработка модели «Распорки и тяжи». На данном этапе определяется положение распорок и тяжей в первом приближении.

Этап 6. Определение усилий в элементах модели (распорках и тяжах) на основании статической схемы расчета. Действующие нагрузки должны быть полностью уравновешены усилиями в структурных элементах модели.

Этап 7. Конструирование распорок и тяжей (а именно определение геометрических параметров сжатых распорок и площади поперечного сечения арматуры и ее расположения в конструктивном элементе) на основании сопротивления данных элементов в предельной стадии работы конструктивного элемента.

Этап 8. Конструирование узловых элементов на основании их сопротивления в предельной стадии работы конструктивного элемента.

Этап 9. Корректировка первоначальной модели «Распорки и тяжи» (в случае необходимости).

Этап 10. Конструирование армирования, требуемого для ограничения ширины раскрытия трещин по высоте конструктивного элемента (crack control reinforcement).

Этап 11. Обеспечение требований анкеровки продольной арматуры.

Независимо от того, в соответствии с каким нормативным документом выполняется расчет железобетонного элемента в области с неоднородным распределением напряжений на действие поперечной силы [10–13], общая концепция модели «Распорки и тяжи» [7] в целом следует приведенному ранее алгоритму расчета. При этом только два нормативных документа [11; 12] акцентируют внимание именно на порядке расчета в соответствии с моделью «Распорки и тяжи». Причем только в одних нормах [11] содержится требование по определению предельной поперечной силы в эксплуатационный период, и в то же время, полагая прочность узловых элементов наиболее важной, прочности сжатых распорок не уделено должного внимания. Отметим, что остальные нормативные документы [10; 12; 13] ограничиваются лишь основными требованиями к конструированию и прочности узловых элементов, распорок и тяжей.

Анализируя нормативные документы [10–13], а также работы [7; 15], можно сделать вывод о том, что в рамках некоторой единой концепции модели «Распорки и тяжи» отсутствует единый подход к содержанию отдельных этапов расчета в соответствии с данной моделью. Так, если при разделении конструктивного элемента на области с однородным и неоднородным распределением напряжений в соответствии с принципом Сен-Венана (этап 1), при определении внешних нагрузок и опорных реакций (этап 2), при анализе граничных условий между *B*- и *D*-областями (этап 3), а также при определении усилий в структурных элементах модели (этап 6) никаких расхождений в нормах [10–13] не возникает, то на всех остальных этапах расчета в отмеченных нормах приводятся свои отличительные требования в рамках модели «Распорки и тяжи».

Рассмотрим более подробно отличительные требования к расчету железобетонных элементов в областях с неравномерным распределением напряжений при действии поперечных сил в соответствии с моделью «Распорки и тяжи».

Определение предварительных геометрических параметров конструктивного элемента на основании расчета предельной поперечной силы, при которой образуются диагональные трещины в эксплуатационный период

Как было отмечено выше, только в нормах [11] определяется предельная поперечная сила, при которой начинают образовываться наклонные трещины в эксплуатационный период:

$$V_{cr} = \left[0,2 - 0,1 \cdot \left(\frac{a}{d} \right) \right] \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d, \quad (1)$$

при этом

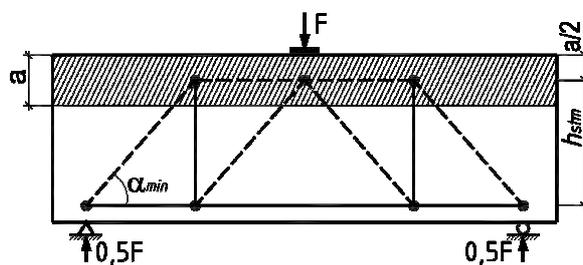
$$0,0632 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \leq V_{cr} \leq 0,158 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \leq V_{cr}, \quad (2)$$

где f'_c – расчетная прочность бетона на сжатие, определенная на цилиндрических образцах в стандартных условиях (в ksi); a – пролет среза (в дюймах); d – расчетная высота сечения конструктивного элемента (в дюймах); b_w – ширина поперечного сечения конструктивного элемента (в дюймах).

Если действующая поперечная сила V от эксплуатационных нагрузок не превышает предельную поперечную силу V_{cr} , определенную по зависимости (1), это значит, что при принятых геометрических параметрах поперечного сечения конструктивного элемента в эксплуатационный период наклонные трещины не будут образованы. Иначе необходимо изменить геометрические параметры поперечного сечения конструктивного элемента. Отметим, что зависимость (1) может быть применима в случае, если выполняется условие $a/d < 2$.

Разработка модели «Распорки и тяжи»

Геометрическая интерпретация модели «Распорки и тяжи» (рисунок 4) является одним из наиболее значимых этапов расчета, поскольку именно от него зависит как точность, так и продолжительность расчета в целом.



a – высота сжатой зоны; h_{stm} – оптимальная высота модели

Рисунок 4. – Расположение структурных элементов модели «Распорки и тяжи»

Построение модели «Распорки и тяжи» может осуществляться следующими способами [15]: 1) на основании принципа «траектории эффекта нагрузки» («load path»), учитывающего места расположения сосредоточенных сил и опорных реакций; 2) используя характерную схему трещинообразования; 3) посредством расчета в любом программном комплексе, использующем метод конечных элементов и позволяющем наглядно представить систему сжатых и растянутых полей в условиях нагружения. При этом независимо от пути построения модели должны быть соблюдены следующие требования [7; 10–13; 15]:

- центрально сжатые элементы (распорки) представляют собой равнодействующие сжатых полей напряжений; центрально растянутые элементы (тяжи) – равнодействующие растянутых полей напряжений;
- местоположение тяжей является центром тяжести растянутой арматуры;
- минимальный угол между наклонными распорками и тяжами, расположенными в центре тяжести растянутой арматуры, составляет 25° (рисунок 5) [10; 11];
- наиболее рациональной является модель с минимальным количеством вертикальных тяжей при их минимальной длине;
- положение и направление распорок и тяжей должны быть ориентированы в соответствии с линейной теорией упругости;
- призматическая распорка должна быть расположена в середине высоты сжатой зоны, при этом высота сжатой зоны определяется по зависимости:

$$a = \frac{A_s \cdot f_s - A'_s \cdot f'_s}{a_1 \cdot f'_c \cdot b_w}, \quad (3)$$

где A_s, A'_s – площадь поперечного сечения нижней и верхней арматуры соответственно; f_s, f'_s – расчетное сопротивление нижней и верхней арматуры соответственно; a_1 – коэффициент сжатой зоны (при расчете по [10; 11] $a_1 = 0,85$; при расчете по [12; 13] $a_1 = 0,8$);

- полученная модель должна находиться в равновесии.

Следует отметить, что ограничение минимального угла наклона сжатой распорки $\alpha = 25^\circ$ получено на основании экспериментальных данных и направлено на недопущение значительных напряжений в арматуре и сдерживание ширины раскрытия диагональных трещин [7; 15]. Однако в нормах [12; 13] специальных требований по ограничению угла наклона сжатых распорок не указано.

Отметим также, что одной из особенностей модели «Распорки и тяжи» является то, что при конкретной схеме нагружения и геометрических характеристиках конструктивного элемента может быть получено несколько расчетных моделей [7].

Конструирование и расчет сопротивления сжатым и растянутым структурным элементам модели «Распорки и тяжи»

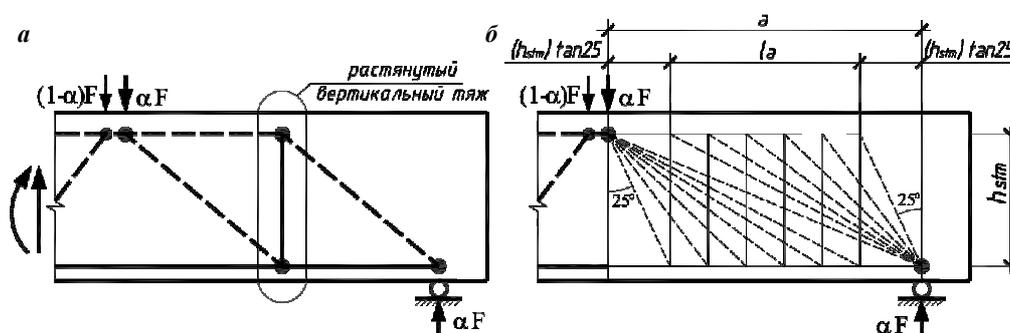
Конструирование и расчет сопротивления растянутым тяжам

Конструирование и расчет сопротивления растянутым тяжам, которые в большинстве случаев представляют собой центр тяжести растянутой арматуры, являются наименее спорным вопросом в модели «Распорки и тяжи». В общем случае сопротивление осевому растяжению тяжей определяется следующим образом [10]:

$$F_{u,ie} = f_y \cdot A_{st} + A_{sp} \cdot (f_{pe} + f_y), \quad (4)$$

где f_y, f_{pe} – предел текучести ненапрягаемой и напрягаемой арматуры соответственно; A_{st}, A_{ps} – площадь поперечного сечения ненапрягаемой и напрягаемой арматуры соответственно.

Следует обратить внимание, что расчет сопротивления и конструирование вертикальных тяжей рекомендуется выполнять, руководствуясь требованиями, приведенными на рисунке 5 [10].



α – пролет среза; l_a – рабочая длина (available length)
 a – расположение вертикального тяжа в модели; b – расположение стержней поперечной арматуры

Рисунок 5. – Требования к расположению стержней поперечной арматуры

Конструирование и расчет сопротивления сжатым распоркам

На основании [7] выделяют три формы распределения сжимающих напряжений (рисунок 6):

1) призматическая форма; 2) «fan-shaped» форма; 3) «bottle-shaped» форма.

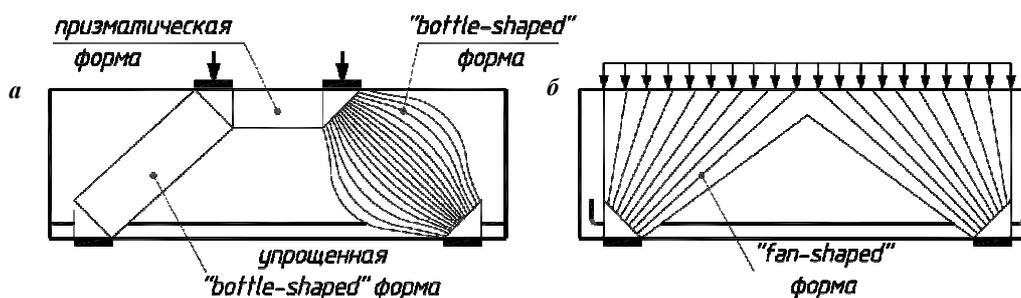


Рисунок 6. – Расположение в конструктивном элементе полей напряжений призматической формы (а), «bottle-shaped» формы (а), «fan-shaped» формы (б)

Первые две формы (призматическая и «fan-shaped») характеризуются отсутствием в них растягивающих напряжений. Особенностью сжатых полей напряжений «bottle-shaped» формы, располагаемых по линии действия «сила – опора», является наличие в их пределах растягивающих напряжений, что приводит к снижению прочности на сжатие результирующей распорки (так называемый «эффект разупрочнения») и учитывается посредством коэффициента разупрочнения бетона.

Отметим, что определение коэффициента разупрочнения бетона при плоском напряженном состоянии является весьма спорным вопросом, о чем свидетельствуют многочисленные диаграммы деформирования бетона в условиях «растяжение – сжатие» [16; 17]. Различие в подходах к определению коэффициента разупрочнения бетона нашло отражение и в модели «Распорки и тяжи» (таблицы 1, 2).

Предельное усилие в сжатой бетонной распорке в общем случае определяется по следующей зависимости:

$$F_{u, strut} = f_{max, strut} \cdot A_{c, strut}, \quad (5)$$

где $f_{max, strut}$ – предельное напряжение сжатой бетонной распорки (таблица 1); $A_{c, strut}$ – площадь поперечного сечения бетона распорки.

Особенности расчета предельного напряжения сжатой бетонной распорки с учетом коэффициента разупрочнения бетона в соответствии с требованиями норм [10–13] приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Особенности определения сжимающих напряжений в бетонных распорках

Нормы	Напряжения в бетоне	Примечание
[10]	$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_s \cdot f_c'$ (6)	β_s – коэффициент разупрочнения бетона распорки, принимается в зависимости от коэффициента армирования ρ_{ss} : $\beta_s = \begin{cases} 0,75 \cdot \lambda, & \text{если } \rho_{ss} \geq 0,3\%; \\ 0,6 \cdot \lambda, & \text{если } \rho_{ss} < 0,3\%. \end{cases}; \quad \rho_{ss} = \sum \frac{A_{si}}{b_s \cdot s_i} \cdot \sin \alpha_i \quad (7)$ λ – коэффициент, для тяжелого бетона равный 1
[11]	$f_{cu} = 0,7 \cdot f_{ci}$ (8)	f_{ci} – расчетная прочность бетона на сжатие к началу нагружения конструктивно-го элемента
[12]	$f_{cE} = k_c \cdot f_{ck}$ (9)	k_c – коэффициент разупрочнения бетона распорки, принимается равным: $k_c = 0,75 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок с трещинами, параллельными направлению сжимающих напряжений и армированными стержнями, перпендикулярными сжимающим напряжениям); $k_c = 1,0 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок с равномерным одноосным сжатием); $k_c = 0,55 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок, пересекаемых арматурой под углом $\leq 65^\circ$) $\eta_{fc} = (30/f_{ck})^{1/3} \leq 1,0 \quad (10)$
[13]	$\sigma_{cd} = v \cdot f_{cd}$ (11)	v – коэффициент разупрочнения бетона распорки, определяется на основании зависимости: $v = \frac{1}{1,2 + 80 \cdot \epsilon_1}; \quad \epsilon_1 = \epsilon_x + (\epsilon_x + 0,001) \cdot \cos^2 \theta_{sc} \quad (12)$ Принимая $\epsilon_x \approx 0,001$: $v = \frac{1}{1,2 + 0,16 \cdot \cos^2 \theta_{sc}} \leq 1. \quad (13)$ Коэффициент разупрочнения v с учетом зависимостей (12) и (13) можно определить упрощенно следующим образом: - для сжатых распорок, пересекаемых растянутым тяжом под углом θ_{sc} : $v = \begin{cases} 0,4, & \text{если } 20^\circ \leq \theta_{sc} < 25^\circ; \\ 0,5, & \text{если } 25^\circ \leq \theta_{sc} < 35^\circ; \\ 0,6, & \text{если } 35^\circ \leq \theta_{sc} < 45^\circ; \\ 0,7, & \text{если } 45^\circ \leq \theta_{sc} < 90^\circ; \end{cases} \quad (14)$ - для сжатых распорок: 1) испытывающих сжимающие напряжения в перпендикулярном направлении или 2) при отсутствии растянутых тяжей: $v = 1$
<i>Примечание.</i> Обозначения характеристик бетона в таблице приняты в соответствии с рассматриваемым нормативным документом без изменений.		

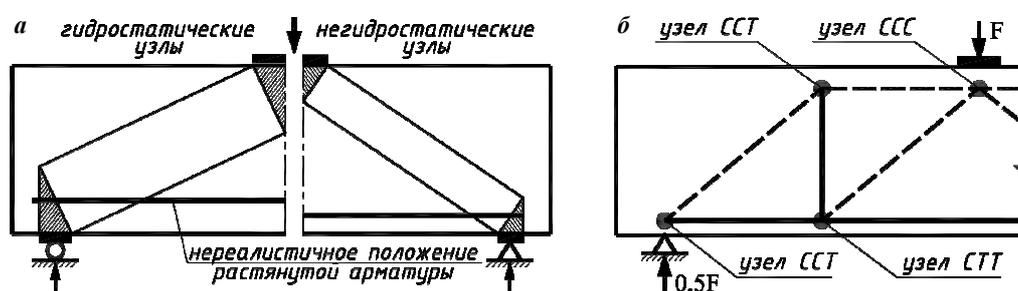
Конструирование и расчет сопротивления узловых элементов

Узловые элементы, представляя собой фактически точку пересечения распорок и тяжей, обеспечивают перераспределение напряжений между сжатыми и растянутыми структурными элементами модели и тем самым приводят систему в равновесие. Причем такое перераспределение напряжений реализуется на ограниченной области, вокруг узла, что вызывает значительные напряжения в пределах узловых элементов [7].

Рассматривая возможное распределение напряжений на поверхности узлового элемента, выделяют гидростатические и негидростатические узлы [10]. Для гидростатического узла характерно равенство напряжений по всем его поверхностям, в то время как негидростатический узел формируется посредством действительного распределения напряжений в конструктивном элементе (рисунок 7, а). Ввиду того, что модель «Распорки и тяжи» стремится отобразить работу конструктивного элемента максимально приближенно к действительности, нормы [10–13] рекомендуют рассматривать только негидростатические узлы.

В общем случае, в зависимости от типов структурных элементов (сжатые распорки (compression), растянутые тяжи (tension)), сходящихся в узлах, выделяют четыре типа последних [7; 10; 11; 13]: узел ССС, который образован сжатыми распорками; узел ССТ, в котором сходятся сжатые распорки и растянутый тяж, ориентированный в одном направлении; узел СТТ, в котором сходятся сжатые распорки и растянутые тяжи, ориентированные в двух направлениях; узел ТТТ, который образован только растянутыми тяжами (рисунок 7, б).

Отметим, что узел типа ТТТ встречается на практике крайне редко, поскольку в качестве одного из тяжей предполагается растянутый бетон. По этой причине в нормативных документах [10–13] приведены требования к конструированию и расчету только узловых элементов типа ССС, ССТ и СТТ.



а – гидростатические и негидростатические узлы;
б – пример расположения узловых элементов

Рисунок 7. – Узловые элементы модели «Распорки и тяжи»

Конструирование всех типов узлов осуществляется на основании расчетной схемы модели «Распорки и тяжи» в соответствии со следующими правилами:

- 1) каждый узел ограничен тремя поверхностями, по которым действуют напряжения:
«Strut-to-Node»- поверхность – на границе с примыкающей сжатой распоркой,
«Back»-поверхность – обратная границе примыкания сжатой распорки,
«Bearing»-поверхность – со стороны приложения нагрузки или опорной реакции;
- 2) усилия, действующие по каждой поверхности, направлены перпендикулярно рассматриваемой поверхности по линии, проходящей через ее центр тяжести;
- 3) в узле должно сходитьсь не более трех структурных элементов, иначе смежные структурные элементы должны быть рассмотрены совместно;
- 4) в случае узлового элемента типа ССС для упрощения расчета рассматриваются отдельно правая и левая части.

Для наглядности требования к конструированию узловых элементов приведены на рисунках 8, 9.

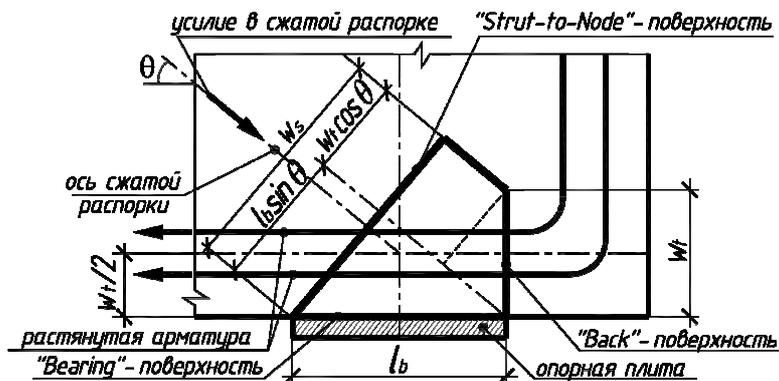


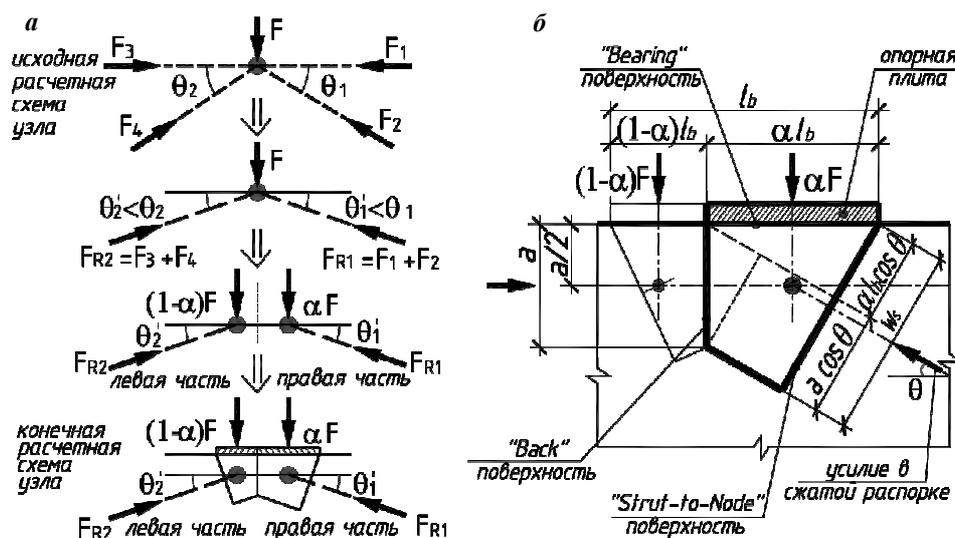
Рисунок 8. – Геометрические параметры узла типа ССТ [15]

На рисунке 8 приняты следующие обозначения: w_t – длина «Back»-поверхности, принимается равной двойному расстоянию от наиболее растянутой грани конструктивного элемента до центра тяжести растянутой арматуры; l_b – длина «Bearing»-поверхности, принимается равной длине опорной пластины; w_s – длина «Strut-to-Node»-поверхности, определяется по следующей зависимости:

$$w_s = l_b \cdot \sin \theta + w_t \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где θ – угол наклона сжатой распорки.

Наиболее трудоемкими в конструировании являются узлы типа ССС, поскольку в большинстве случаев в таких узлах сходятся более трех распорок, следовательно, требуется корректировка узла в виде сокращения количества распорок и дальнейшего разделения узла на правую и левую части. Порядок конструирования узла типа ССС приведен на рисунке 9.



a – корректировка расчетной схемы узла;
б – геометрические параметры откорректированного узла

Рисунок 9. – Порядок конструирования узла типа ССС

В соответствии с рисунком 9 длина «Strut-to-Node» определяется из выражения

$$w_s = a \cdot \cos \theta + \alpha \cdot l_b \cdot \sin \theta, \quad (16)$$

где a – высота сжатой зоны, определяемая из выражения (3).

Отметим, что после разделения узлового элемента типа ССС на части (правую и левую) к дальнейшему рассмотрению принимается наиболее нагруженная.

Проанализированные выше узловы элементы типа ССТ и ССС, называемые в соответствии с [7] единичными, обладают четкими геометрическими параметрами. В некоторых случаях узлы типа ССТ (рисунок 10), могут классифицироваться как «размазанные» (smeared nodes), поскольку для них невозможно определить конкретные геометрические параметры ввиду отсутствия примыкающих опорных плит или четких границ конструктивного элемента. Кроме этого, наклонные распорки, сходящиеся в таких узлах, рассеивают напряжения на значительные расстояния [7]. По этим причинам, а также ввиду незначительных напряжений в пределах «размазанных» узлов в работе [7] рекомендуется такие узлы не проверять на прочность.

Согласно [15], несущая способность узлового элемента должна быть достаточной, чтобы воспринимать воздействие от сходящихся в нем структурных элементов без разрушения бетона. В общем случае предельное усилие, воспринимаемое поверхностью узла, определяется по зависимости:

$$F_{u,node} = f_{\max,node} \cdot A_{c,node}, \quad (17)$$

где $f_{\max,node}$ – предельное сжимающее напряжение на поверхности узла (таблица 2); $A_{c,node}$ – площадь поперечного сечения бетона узловы поверхности.

Таблица 2. – Определение предельных напряжений на узловых поверхностях

Нормы	Предельные напряжения на узловой поверхности
[10]	$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot f'_c, \quad (18)$ <p>где β_n – коэффициент разупрочнения бетона: $\beta_n = 1$ (узел CCC), $\beta_n = 0,8$ (узел CCT), $\beta_n = 0,6$ (узел CTT); f'_c – расчетное значение цилиндрической прочности бетона на сжатие</p>
[11]	$f_{cu} = m \cdot v \cdot f'_c \quad (19)$ <p>где m – коэффициент, учитывающий положительный эффект от трехосного сжатия в бетоне; v – коэффициент разупрочнения бетона; f'_c – расчетное значение цилиндрической прочности бетона на сжатие. При отсутствии арматуры, требуемой для ограничения ширины раскрытия трещины по высоте, коэффициент $v = 0,45$ для всех типов узловых поверхностей.</p>
[12]	$\sigma_{Rd,max} = k_c \cdot f_{ck}, \quad (20)$ <p>где k_c – коэффициент разупрочнения бетона; f_{ck} – характеристическое значение цилиндрической прочности на сжатие в возрасте 28 суток</p>
[13]	$\sigma_{cd} = v \cdot f_{cd} \quad (21)$ <p>где v – коэффициент разупрочнения бетона.</p> <p>$v = 1$</p> <ul style="list-style-type: none"> - если тяж полностью заанкерен внутри узловой зоны элемента: v – по формуле (14) в таблице 1; - если тяж заанкерен за пределами узловой зоны элемента: $v = 1$; - принимается промежуточное значение v в зависимости от степени анкеровки <p>- в случае гнутых профилей, а также, если тяж заанкерен внутри узловой зоны элемента: v – по формуле (14) в таблице 1;</p> <p>- если тяж заанкерен за пределами узловой зоны элемента: $v = 1$</p>
<p><i>Примечание.</i> Обозначения характеристик бетона в таблице приняты в соответствии с рассматриваемым нормативным документом без изменений.</p>	

Конструирование армирования, требуемого для ограничения ширины раскрытия трещины по высоте конструктивного элемента (crack control reinforcement)

Данный тип армирования представлен на рисунке 10.

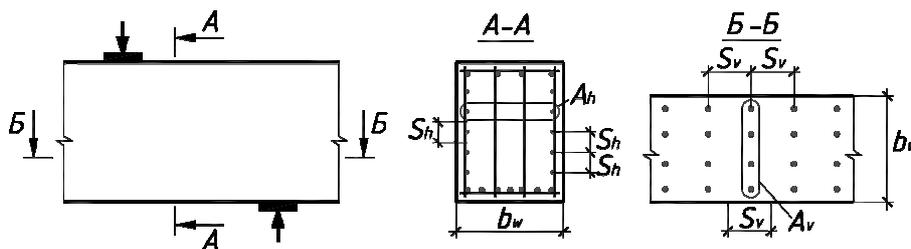


Рисунок 10. – Ограничивающая арматура

Ограничивающая арматура рекомендуется только нормативными документами [10; 11] для ограничения ширины раскрытия диагональной трещины при эксплуатационных нагрузках для всех конструктивных элементов за исключением плит и фундаментов, при этом минимальный коэффициент ограничивающего армирования принимается равным 0,3% в каждом направлении:

$$\rho_{sv} = \frac{A_v}{b_w \cdot S_v} \geq 0,3\%; \quad \rho_{sh} = \frac{A_h}{b_w \cdot S_h} \geq 0,3\%, \quad (22)$$

где A_v, A_h – площадь поперечного сечения ограничивающей арматуры в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно; b_w – ширина поперечного сечения конструктивного элемента; S_v, S_h – шаг ограничивающей арматуры в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно; $S_v, S_h \leq d/4$ или 12 in.

Обеспечение требований анкеровки продольной арматуры

Несмотря на то, что обеспечение требований анкеровки арматуры приводится в завершении алгоритма расчета в соответствии с моделью «Распорки и тяжи», данный этап является одним из ключевых, поскольку только при достаточной длине анкеровки продольной арматуры возможно перераспределение напряжений в узловых элементах, а следовательно и реализация модели в целом [7]. Отметим также, что проверка прочности структурных элементов модели (распорок, тяжей и узлов) выполняется с учетом обеспеченной длины анкеровки продольной арматуры.

Согласно [11], критическое сечение для определения длины анкеровки арматуры в узловом элементе определяется в соответствии с рисунком 11.

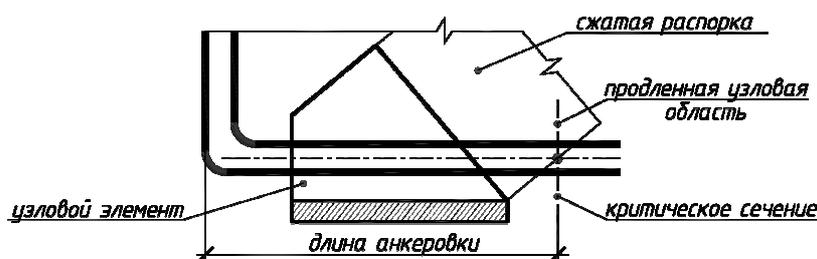


Рисунок 11. – Определение длины анкеровки растянутых тяжей

Таким образом, в заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- комплексное рассмотрение основных положений по расчету железобетонных конструктивных элементов в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» на основании требований нормативных документов [10–13] позволяет констатировать, что отмеченная модель, несмотря на длительность итерационных процедур, в доступной и достаточно адекватной форме воспроизводит сложную работу конструктивного элемента в условиях нагружения в виде системы центрально сжатых и центрально растянутых структурных элементов;

- на основании данной модели в первую очередь возможно определение сопротивления тех областей конструктивного элемента, где местное действие нагрузки (например, вблизи опор) оказывает существенное влияние на прочность элемента в целом. При этом общая концепция модели не противоречит положениям классической модели ферменной аналогии и может быть рассмотрена при расчете сопротивления всего конструктивного элемента;

- накопленный практический опыт применения модели «Распорки и тяжи», в первую очередь в области геотехнических сооружений, где действие поперечных сил оказывает определяющее влияние на прочность элемента в целом, свидетельствует о содержательной и рациональной концепции модели [7], позволяющей адаптировать порядок расчета к возможным ситуациям или условиям, определяющим расчетные требования к строительным конструкциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ritter, W. Die Bauweise Hennebique / W. Ritter // Schweizerische Bauzeitung. – 1899. – V. 33, № 7. – P. 59–61.
2. Mörsch, E. Concrete-Steel Construction / E. Mörsch // McGraw-Hill (English translation by E.P. Goodrich). – New York, 1909.
3. Lampert, P. Ultimate Strength and Design of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending / P. Lampert, B. Thürlimann // IABSE Publications. – Zurich, Switzerland, 1971. – № 31-1. – P. 107–131.

4. Ramirez, J. Evaluation of Modified Truss-Model Approach for Beams in Shear / J. Ramirez, J.E. Breen // Center for Transportation Research Report № 248-4F. – Austin, Texas, 1983.
5. Ramirez, J. Proposed Design Procedure for Shear and Torsion in Reinforced and Prestressed Concrete / J. Ramirez, J.E. Breen // ACI Structural Journal. – 1991. – V. 88, № 5. – P. 562–571.
6. Kupfer, H. Erweiterung der Mörsch Schen Fachwerkanalogie mit Hilfe des Prinzips von Minimum der Formänderungsarbeit (Generalization of Mörsch Truss Analogy Using the Principle of Minimum Strain Energy) / H. Kupfer // Comite Euro-International du Beton, Bulletin d'Information, № 40, CEB. – Paris, 1964. – P. 44–57.
7. Schlaich, J. Towards a Consistent Design of Structural Concrete / J. Schlaich, K. Schäfer, M. Jennewein // Journal of the Prestressed Concrete Institute. – May-June 1987. – V. 32. – № 3. – P. 74–150.
8. Гвоздев, А.А. Определение разрушающей нагрузки для статически неопределимых систем, претерпевающих пластические деформации / А.А. Гвоздев. – Проект и стандарт, 1934. – № 8. – С. 10–16.
9. Examination of the AASHTO LRFD Strut and Tie Specifications. Center for Transportation Research Report 0-4371-2 / M.D. Brown [et al.]. – University of Texas, Austin, April 2006. – 330 p.
10. ACI (American Concrete Institute) Committee 318. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 – 14) and Commentary (ACI 318R-14). – Farmington Hills, MI: ACI.
11. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. – 8th Edition. – Washington, September 2017.
12. *fib* Model Code 2010, Vol.1. – Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, Lausanne, March 2010.
13. Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures: prEN 1992-1-1:2018 (Eurocode 2). – Brussel : European Committee for Standardization, April 2018. – 293 p.
14. Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1: 2001 (Eurocode 2) / Brussel : European Committee for Standardization, Introduced October 2001. – 230 p.
15. Williams, C. Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges: Final Report FHWA/TX-12/5-5253-01-1 / C. Williams, D. Deschenes, O. Bayrak. – Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin. – June 2012.
16. Тур, В.В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В.В. Тур, А.А. Кондраччик. – Брест : БрГТУ, 2000. – 397 с.
17. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест : БрГТУ, 2003. – 252 с.

Поступила 05.12.2018

THE MAIN PROVISIONS OF “STRUT-AND-TIES” MODEL FOR THE CALCULATION OF SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

V. SANNIKAVA, V. TUR

The main provisions of “Strut-and-ties” model, based on the current code requirements are considered. The basic requirements for design and calculation of resistance of compression and tension model elements are summarized. Various approaches to the calculation of the resistance of compression elements, taking into account the softening coefficient of concrete are presented.

Keywords: reinforced concrete elements, model, truss analogy, shear strength, softening of concrete, anchorage of reinforcement.

УДК 624.044:624.012.4

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ «РАСПОРКИ И ТЯЖИ» ДЛЯ ОДНОПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, ЗАГРУЖЕННЫХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛОЙ

О.Г. САННИКОВА; д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР
(Брестский государственный технический университет)

Демонстрируются результаты экспериментальных исследований однопролетных железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой в середине пролета. Представлен расчет опытных балок в соответствии с положениями модели «Распорки и тяжи», приведенными в зарубежных нормативных документах. Дан сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки для опытных балок.

Ключевые слова: железобетонные балки, двухпанельная модель, продольное и поперечное армирование, разрушающая нагрузка, конструктивное решение.

Введение. Для возможности апробации алгоритма расчета [1] для элементов без предварительного напряжения арматуры в соответствии с моделью «Распорки и тяжи», а также для верификации основных положений данной модели, предложенных в нормативных документах [2–5], проведены экспериментальные и теоретические исследования четырех балочных однопролетных образцов из тяжелого бетона, нагруженных одной сосредоточенной силой в середине пролета. Варьируемым параметром опытных образцов принимался тип продольного и поперечного армирования.

Методика проведения экспериментальных исследований. Конструктивное решение опытных балок приведено на рисунке 1, номенклатура балок представлена в таблице 1.

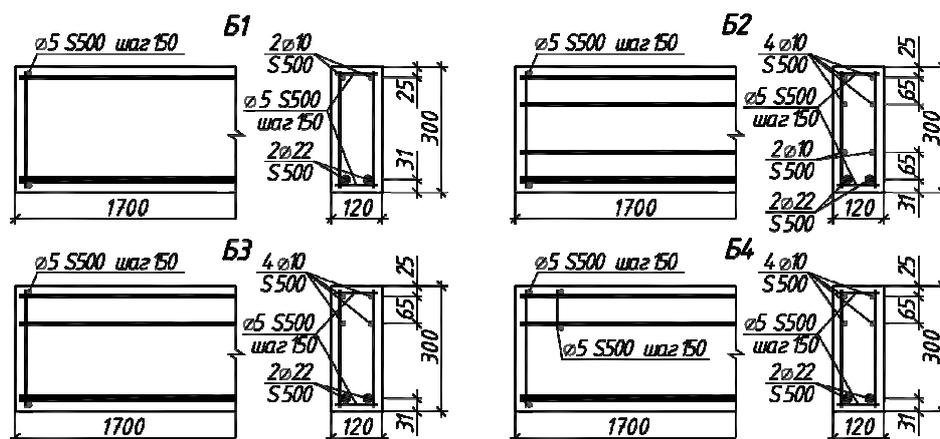


Рисунок 1. – Конструктивное решение опытных образцов

Таблица 1. – Номенклатура опытных образцов

Маркировка образцов	Геометрические параметры образцов, $b \times h \times L$, мм	Средняя кубическая прочность бетона в возрасте 28 сут, МПа	Площадь поперечного сечения продольной арматуры, см ²	
			верхней	нижней
Б1	120×300×1700	29,6	1,54	7,6
Б2		29,5		
Б3		29,2		
Б4		29,6		

Все опытные образцы изготовлены в заводских условиях. Одновременно с опытными балками бетонировались контрольные образцы (кубы 10×10×10). Балки и контрольные образцы твердели в пропарочной камере, затем (до момента испытания) – в воздушно-сухих условиях.

Прочность бетона на сжатие (см. таблицу 1) определена в лаборатории в заводских условиях в соответствии с требованиями [6].

Физико-механические характеристики арматурных стержней определены в лабораторных условиях в соответствии с [7]: для арматуры Ø22 S500 – в машине разрывной универсальной УМН-100;

для арматуры $\varnothing 10$ S500 – в машине разрывной ИР-515-500-11; для арматуры $\varnothing 5$ S500 – в машине испытательной универсальной Quasar 25 № VAPF (таблица 2).

Таблица 2. – Физико-механические характеристики арматурных стержней

Диаметр стержня, мм	Физический предел текучести, f_{yt} , МПа	Модуль упругости, E_s , ГПа
5	708	200
10	563	
22	577	

Статические испытания опытных балок производили по схеме однопролетной балки на изгиб.

Пролет среза для всех балок принят $a/d = 2,5$.

Все опытные балки разрушились по диагональной трещине в результате разрушения бетона над вершиной диагональной трещины (рисунок 2).

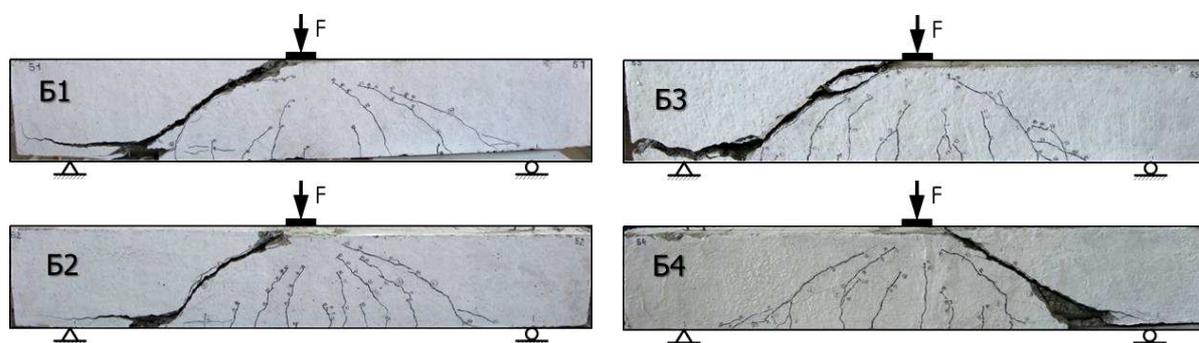


Рисунок 2. – Разрушение опытных образцов

Расчет опытных балок в соответствии с моделью «Распорки и тяжи». В соответствии с алгоритмом расчета «Распорки и тяжи» [1] выполнено деление опытных балок на области с равномерным (*B*-область) и неравномерным (*D*-область) распределением напряжений, основываясь на принципе Сен-Венана, а также определены (в общем виде) значения опорных реакций (рисунок 3).

Ввиду незначительных размеров областей с равномерным распределением напряжений допускается рассматривать весь конструктивный элемент как область с неравномерным распределением напряжений.

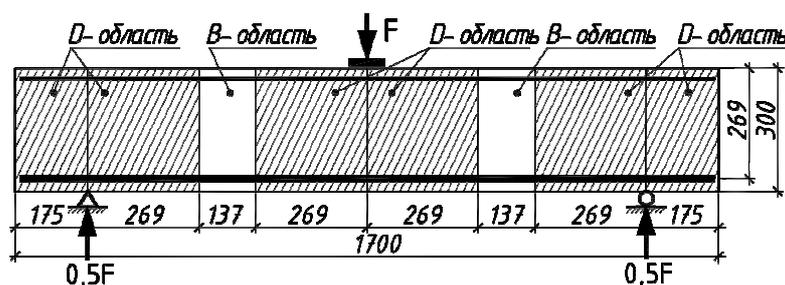


Рисунок 3. – Разделение образцов на *B*- и *D*-области

Поскольку в настоящих исследованиях расчет в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» выполняется при известных геометрических параметрах железобетонных балок, определение предварительных геометрических параметров на основании расчета предельной поперечной силы в эксплуатационный период можно опустить.

С учетом требований к построению модели [1] наиболее рациональной является двухпанельная модель, полученная на основании принципа «траектории эффекта нагрузки» (рисунок 4, *a*).

Усилия, действующие в распорках и тяжах, определены на основании статической схемы методом вырезания узлов (рисунок 4, *b*) и показаны в общем виде.

Основные параметры расчетной модели «Распорки и тяжи» приведены в таблице 3.

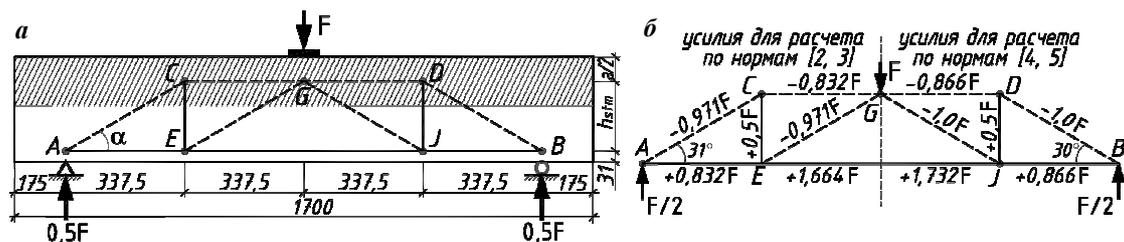


Рисунок 4. – Двухпанельная модель «Распорки и тяжи» (а) и усилия в структурных элементах (б)

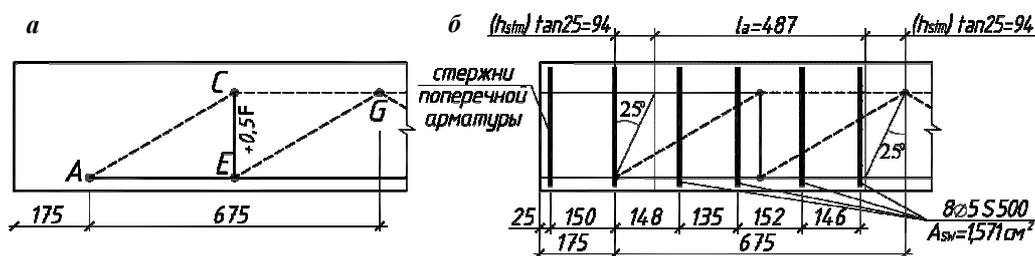
Таблица 3. – Параметры модели «Распорки и тяжи» для опытных балок Б1–Б4

Маркировка образцов	Параметры					
	высота сжатой зоны a , см		оптимальная высота модели $h_{стм}$, см		угол наклона распорки α , град	
	[2; 3]	[4; 5]	[2; 3]	[4; 5]	[2; 3]	[4; 5]
Б1	13,6	14,5	201	196	31	30
Б2	13,7	14,5	201	196		
Б3	13,8	14,7	200	195,5		
Б4	13,6	14,5	201	196		

Определение сопротивления растянутых тяжей

Вертикальный растянутый тяж CE

Расчетная схема для определения предельного усилия в растянутом тяже CE приведена на рисунке 5. С учетом фактического расстояния между стержнями поперечной арматуры во всех опытных балках (Б1–Б4) по длине l_a было расположено 8Ø5S500 ($A_{sw} = 1,571 \text{ см}^2$). Следовательно, предельное усилие в тяже CE , определенное по зависимости (4) в [1], для балок Б1–Б4 составляет $F_{u, tie, w} = 111,2 \text{ кН}$.



а – фрагмент модели «Распорки и тяжи»;
б – схема расположения стержней поперечной арматуры

Рисунок 5. – Расчетная схема растянутого тяжа CE

Горизонтальный растянутый тяж EJ

Из всех горизонтальных растянутых тяжей, располагаемых в центре тяжести растянутой арматуры, к расчету принимаем тяж EJ , в котором действует наибольшее усилие. Предельное усилие в растянутом тяже EJ , определенное по зависимости (4) [1], для всех опытных балок (Б1–Б4) составило $F_{u, tie} = 438,5 \text{ кН}$.

Проверка прочности наклонных центрально сжатых распорок AC (EG)

Предельные усилия в сжатых наклонных распорках AC (EG) для балок Б1–Б4, определенные в соответствии с нормативными документами [2–5] по зависимости (5) [1] с учетом коэффициента разупрочнения бетона, приведены ниже, в таблице 4.

Проверка прочности узловых элементов

При определении прочности узловых элементов следует различать тип узла (ССС, ССТ, СТТ), а также тип рассчитываемой узловой поверхности.

Классификация узловых элементов для балочных образцов Б1–Б4 приведена на рисунке 6. Узловые элементы C , D , E , J не примыкают к местам приложения нагрузки и к опорам, следовательно, согласно [8], их можно классифицировать как «размазанные» узлы, а проверку их прочности опустить.

Вычисление предельных усилий, воспринимаемых каждой узловой поверхностью, для узлов A , B , G выполняем, предварительно определив геометрические параметры отмеченных узлов (рисунки 7–9).

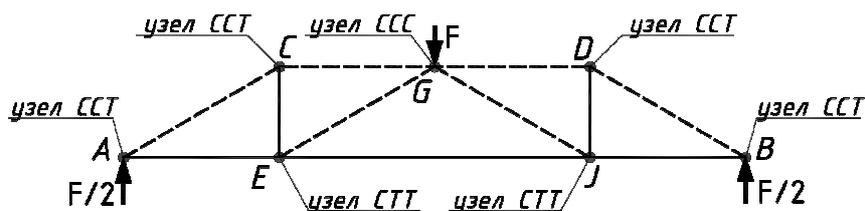


Рисунок 6. – Классификация типов узловых элементов для опытных балок

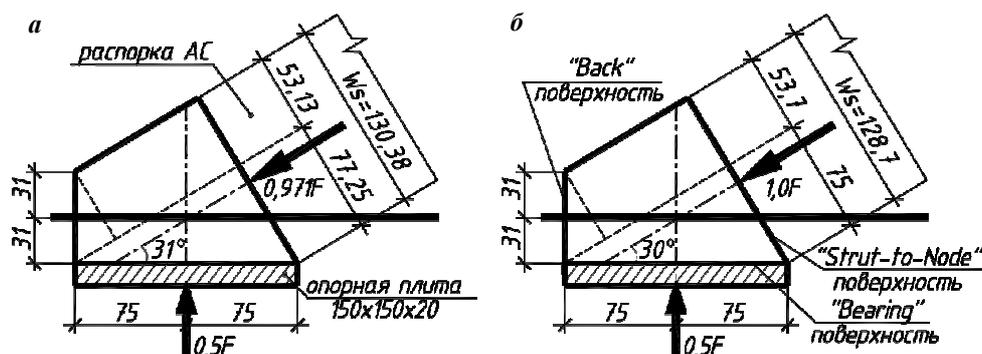


Рисунок 7. – Геометрические параметры узлового элемента А (В) типа CCT в опытных балках Б1–Б4 для расчета по нормам [2; 3] (а); для расчета по нормам [4; 5] (б)

Как было отмечено выше, в случае узлов типа CCC (в опытных балках – узел G) при схождении более трех сжатых распорок следует выполнить корректировку расчетной схемы (рисунок 8).

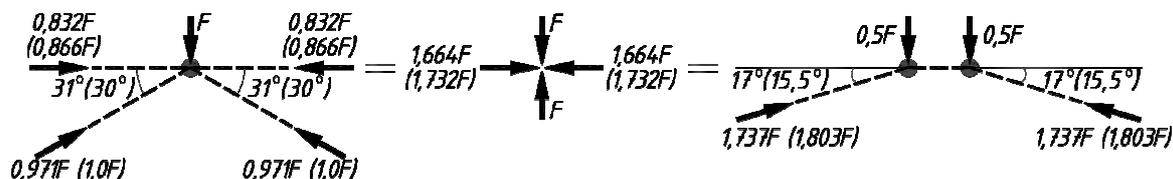
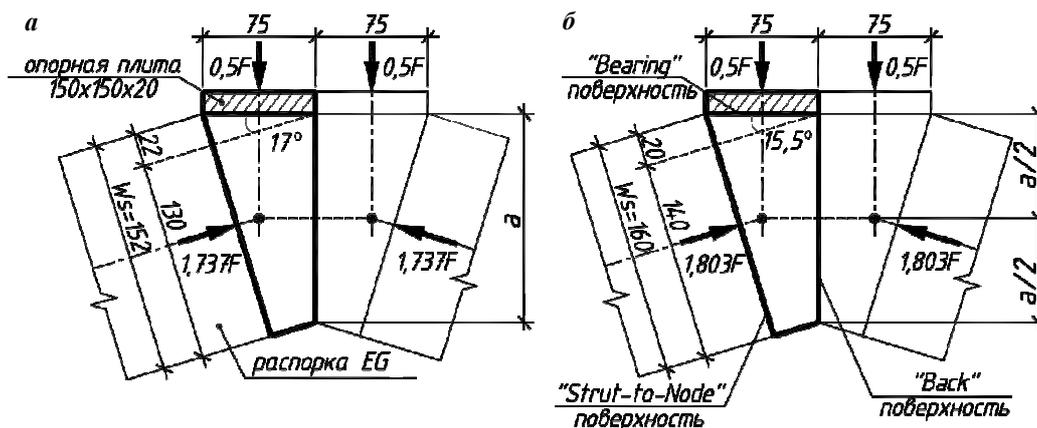


Рисунок 8. – Корректировка расчетной схемы узлового элемента G типа CCC (без скобок приведены значения усилий для расчета по нормам [2; 3], в скобках – по нормам [4; 5])



а – для расчета по нормам [2, 3]; б – для расчета по нормам [4, 5]

Рисунок 9. – Геометрические параметры узлового элемента G типа CCC в опытных балках Б1–Б4

Результаты определения предельных усилий, действующих по поверхностям узловых элементов, для балок Б1–Б4 в соответствии с нормами [2–5] приведены в таблице 4. Следует отметить, что ввиду особенностей конструктивного решения опытных образцов и характерной картины трещинообразования расчет выполнялся только по отношению к “Strut-to-Node”-поверхности и “Bearing”-поверхности.

Таблица 4. – Значения предельных усилий в структурных элементах опытных балок

Маркировка образца	Структурный элемент модели		Предельное усилие в структурном элементе, кН, при расчете по нормам			
			[2]	[3]	[4]	[5]
Б1	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	203,7	308	360	257,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	177	267,7	308,8	220,7
	Узел G, тип ССС	“Bearing”-поверхность	101,9	192,6	240	226,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	206,5	390	512	483,1
	Распорка АС		275,6	200,7	308,8	220,7
	Распорка EG		321,2	234	384	274,4
Б2	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	316	307	358,7	256,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	262,2	267	307,7	220
	Узел G, тип ССС	“Bearing”-поверхность	191,9	191,9	239,5	225,7
		“Strut-to-Node”-поверхность	305,5	388,8	511	481,5
	Распорка АС		274,5	250,4	307,7	220
	Распорка EG		321	291,6	382,6	273,5
Б3	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	312,7	303,8	357	253,8
		“Strut-to-Node”-поверхность	260,3	264,1	306,2	217,7
	Узел G, тип ССС	“Bearing”-поверхность	189,9	190	237,9	223,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	303,3	384,8	507	476,5
	Распорка АС		272	247,6	306,2	217,7
	Распорка EG		316,8	288,6	380,6	270,7
Б4	Узел А (В), тип ССТ	“Bearing”-поверхность	317	308	360	257,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	262,6	267,7	308,8	220,7
	Узел G, тип ССС	“Bearing”-поверхность	192,4	192,6	240	226,4
		“Strut-to-Node”-поверхность	306	390	512	483,1
	Распорка АС		275,6	251	308,8	220,7
	Распорка EG		321,2	292,6	384	274,4

Примечания: 1. При определении предельного усилия по нормам [2] коэффициент разупрочнения $\nu = 0,45$ как для балки, в которой отсутствует арматура, требуемая для ограничения раскрытия трещины по высоте. 2. Предельное усилие в тяже СЕ для всех балок составило 111,2 кН, предельное усилие в тяже ЕJ для всех балок – 438,5 кН.

Теоретические значения разрушающей нагрузки, исходя из прочности структурных элементов для опытных образцов, приведены в таблице 5. Следует отметить, что при расчете узловых элементов минимальное сопротивление оказалось у “Strut-to-Node”-поверхности, следовательно, разрушающая нагрузка приведена исходя из прочности отмеченной поверхности.

Таблица 5. – Значения разрушающей нагрузки в зависимости от прочности структурных элементов в опытных образцах

Маркировка образца	Структурный элемент модели	Разрушающая нагрузка F_u , кН, при расчете по нормам			
		[2]	[3]	[4]	[5]
Б1	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	182,3	275,7	308,8	220,7
	Узел G (“Strut-to-Node”-поверхность)	119*	224,5	284	267,9
	Распорка АС	283,8	206,7	308,8	220,7
	Распорка EG	185	134,7*	213*	152,2*
Б2	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	270	275	307,7	220
	Узел G (“Strut-to-Node”-поверхность)	175,9*	223,8	283,4	267
	Распорка АС	282,7	257,9	307,7	220
	Распорка EG	184,8	167,8*	212,2*	151,7*
Б3	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	268	272	306,1	217,7
	Узел G (“Strut-to-Node”-поверхность)	174,6*	221,5	281,5	264,3
	Распорка АС	280	255	306,1	217,7
	Распорка EG	182,4	166,1*	211*	150,1*
Б4	Узел А (“Strut-to-Node”-поверхность)	270,4	275,7	308,8	220,7
	Узел G (“Strut-to-Node”-поверхность)	176,2*	224,5	284	267,9
	Распорка АС	283,8	258,5	308,8	220,7
	Распорка EG	185	168,5*	213*	152,2*

Примечания: 1. *Минимальная разрушающая нагрузка при расчете по соответствующим нормам. 2. Разрушающая нагрузка исходя из прочности тяжа ЕС для всех балок по нормам [2–5] составила 222,4 кН. 3. Разрушающая нагрузка исходя из прочности тяжа ЕJ для всех балок по нормам [2; 3] составила 263,5 кН, по нормам [4, 5] – 253,2 кН.

Сравнительный анализ результатов исследований. Как следует из данных таблицы 5, несмотря на различия в определении прочности структурных элементов по нормам [3–5], разрушение всех опытных балок следует ожидать от разрушения бетона распорки **EG**, при этом наибольшее различие между расчетными значениями разрушающей нагрузки составило: для балки Б1 – 70%; для балки Б2 – 40%; для балки Б3 – 40,6%; для балки Б4 – 40%. Отметим, что при расчете по нормам [2] разрушение опытных балок Б1–Б4 ожидается от разрушения бетона “Strut-to-Node”-поверхности узла **G** (тип CCC), что по сути также будет происходить в направлении распорки **EG**.

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки представлен в таблице 6. Обратим внимание, что для сравнения с экспериментальными данными принимается минимальное расчетное значение разрушающей нагрузки из определенных по соответствующим нормам.

Таблица 6. – Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений разрушающей нагрузки для опытных балок Б1–Б4

Маркировка образца	Расчетное значение разрушающей нагрузки, кН				Экспериментальное значение разрушающей нагрузки $F_{u,exp}$, кН	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[2]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[3]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[4]}}$	$\frac{F_{u,exp}}{F_{u,calc}^{[5]}}$
	$F_{u,calc}^{[2]}$	$F_{u,calc}^{[3]}$	$F_{u,calc}^{[4]}$	$F_{u,calc}^{[5]}$					
Б1	119	134,7	213	152	229	1,92	1,7	1,075	1,5
Б2	175,9	167,8	212,2	151,7	224	1,27	1,33	1,055	1,47
Б3	174,6	166,1	211	150,1	226	1,29	1,36	1,07	1,5
Б4	176,2	168,5	213	152,2	270	1,53	1,6	1,26	1,77

Примечание. $F_{u,calc}^{[2]}$, $F_{u,calc}^{[3]}$, $F_{u,calc}^{[4]}$, $F_{u,calc}^{[5]}$ – расчетное значение разрушающей нагрузки, определенное в соответствии с нормами [2], [3], [4], [5] соответственно.

Как следует из данных таблицы 6, наилучшая сходимость между расчетными и экспериментальными значениями разрушающей нагрузки наблюдается при расчете по нормам [4]. При этом экспериментальная форма разрушения (по диагональной трещине) полностью совпадает с формой разрушения, определенной по нормам [2–5]; по нормам [3–5] – разрушение по сжатию подкоса **EG**; по нормам [2] – разрушение по “Strut-to-Node”-поверхности узла **G**.

Таким образом, на основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований балок Б1–Б4 на действие поперечной силы можно сделать следующие **выводы**:

1) принятые варианты армирования балок не оказали существенного влияния на морфологию развития трещин в целом для всех опытных образцов;

2) усиленное армирование сжатой зоны стержнями продольной арматуры (балки Б2 и Б3) не привело к увеличению разрушающей нагрузки. В то же время усиление сжатой зоны короткими стержнями поперечной арматуры (балка Б4) повлекло за собой увеличение разрушающей нагрузки на 20%;

3) при определении разрушающей нагрузки в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» по нормам [2–5] дополнительные стержни продольной арматуры в балках Б2, Б3 и Б4 рассматривались в качестве армирования, требуемого для ограничения трещины по высоте сечения (crack control reinforcement). Однако дополнительные короткие стержни поперечной арматуры в балке Б4 при расчете по нормам [2–5] не представилось возможным учесть, что, вероятно, привело к большему расхождению между экспериментальными и теоретическими значениями разрушающей нагрузки для образца Б4 по сравнению с остальными балками;

4) наилучшая сходимость между экспериментальными и теоретическими значениями разрушающей нагрузки наблюдается при расчете по нормам [4]: максимальное отклонение составило 26% для балки Б4. При этом следует отметить значительное расхождение в теоретических значениях разрушающей нагрузки, определенных по нормам [2–5], между собой: для балки Б1 – от 40 до 79%; для балки Б2 – от 20,6 до 39%; для балки Б3 – от 20,8 до 40,6%; для балки Б4 – от 20,9 до 40%;

5) несмотря на значительный разброс теоретических значений разрушающей нагрузки, качественная теоретическая картина разрушения однопролетных опытных балок Б1–Б4 полностью соответствует наблюдаемой в экспериментальных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- Санникова, О.Г. Основные положения модели «Распорки и тяжи» для определения сопротивления срезу железобетонных элементов / О.Г. Санникова, В.В. Тур // Вестник Полоцкого государственного технического университета. – 2018. – № 16. – С. 19–29.

2. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. – 8th Edition. – Washington, September 2017.
3. ACI (American Concrete Institute) Committee 318. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 – 14) and Commentary (ACI 318R-14). – Farmington Hills, MI: ACI.
4. *fib* Model Code 2010, Vol.1. – Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, Lausanne, March 2010.
5. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures: prEN 1992-1-1:2018 (Eurocode 2). – Brussel : European Committee for Standardization, April 2018. – 293 p.
6. Методы испытаний бетона. Ч. 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов : СТБ EN 12390-3-2012. – Введ. 29.08.2012. – Минск : Стройтехнорм, 2012. – 19 с.
7. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение : ГОСТ 12004-81. – Введ. 01.07.83. – Минск : Госстандарт, 2011. – 16 с.
8. Schlaich, J. Towards a Consistent Design of Structural Concrete / J. Schlaich, K. Schäfer, M. Jennewein // Journal of the Prestressed Concrete Institute. – May-June 1987. – V. 32. – № 3. – P. 74–150.

Поступила 17.12.2018

**THE VERIFICATION OF “STRUT-AND-TIES”
MODEL FOR THE SINGLE REINFORCED CONCRETE BEAMS
WITH THE CONCENTRATED LOAD**

V. SANNIKAVA, V. TUR

The results of experimental investigations of the single reinforced concrete beams with the concentrated load are considered. The calculation of the tested beams in accordance with the “Strut-and-ties” model requirements of current codes is presented. The comparative analysis of experimental and theoretical values of the ultimate load for the tested beams is given.

Keywords: *reinforced concrete beams, two-panel model, longitudinal and transverse reinforcement, breaking load, structural solution.*

УДК 624.012.4-183.4; 624.94.014.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛИТ
ИЗ ПЕНОБЕТОНА И ТОНКОСТЕННОГО СТАЛЬНОГО
ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО ОЦИНКОВАННОГО ПРОФИЛЯ**

*канд. техн. наук, доц. А.П. КРЕМНЁВ;
канд. техн. наук, доц. Е.Г. КРЕМНЁВА; Р.А. РАДКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается конструкция опытных образцов из пенобетона и тонкостенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Определена прочность конструкций. Показана картина трещинообразования; представлены графики деформаций сжатой зоны и прогибов опытных образцов, а также построенные эпюры деформаций сжатой и растянутой зоны тонкостенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Установлен факт совместной работы пенобетона и стального профиля в конструкции.

Ключевые слова: *пенобетон, тонкостенный стальной холоднодеформированный профиль, совместная работа, деформации, трещинообразование и прочность конструкции.*

На современном этапе развития народного хозяйства инновационные технологии используются во всех его отраслях, в том числе и в строительной отрасли. Возводить здания и сооружения можно гораздо быстрее и дешевле благодаря быстровозводимым конструкциям. Подобные здания и сооружения строятся в сжатые сроки с минимальными трудозатратами [1; 2]. При этом элементы имеют меньший вес, стоимость изготовления и время монтажа при сохранении прежней несущей способности и эксплуатационных качеств [3].

К наиболее легким и быстровозводимым можно отнести легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), обладающие таким важным достоинством, как индустриальность [4]. Каркасы зданий поставляются на строительную площадку в виде готовых к монтажу наборов промаркированных деталей и элементов. Конструкции из тонкостенных каркасов имеют небольшой вес, что позволяет производить их монтаж без использования дорогостоящей грузоподъемной техники. Кроме того, существенно снижается нагрузка на фундаменты. Данные преимущества легких конструкций в наибольшей степени проявляются при реконструкции зданий и сооружений с целью надстройки дополнительных этажей. Стоит также отметить, что здания или сооружения, построенные из ЛСТК, практически не имеют строительных отходов. При строительстве используются гипоаллергенные материалы, которые безопасны для здоровья человека и окружающей среды [2; 5–7].

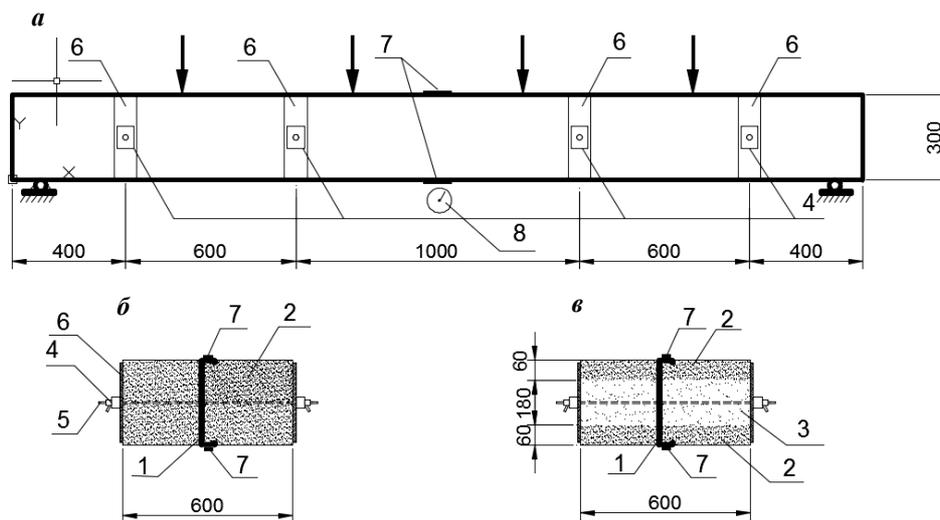
В качестве утеплителя для систем ЛСТК используются минераловатные, базальтовые маты и плиты, стекловата, эковата и другие волокнистые изоляционные материалы [7]. Широкое распространение при возведении ЛСТК получил пенобетон, который представляет собой легкий пористый искусственный каменный материал на цементном вяжущем. Монолитный пенобетон не горюч и может применяться в огнезащитных конструкциях, обладает хорошими теплоизоляционными свойствами, долговечен, считается недорогостоящим материалом; при заливке надежно заполняет опалубку любой формы, не оставляя раковин, каверн и пустот [8]. Данные качества пенобетона идеально подходят и для частного, и для коммерческого домостроения [9].

Как показал обзор технической литературы, наибольшее применение ЛСТК и пенобетон нашли при возведении ограждающих конструкций. В несущих изгибаемых конструкциях, таких как балки, плиты покрытия и перекрытия, ЛСТК и пенобетон на данный момент массового применения пока не имеют. Это связано с тем, что на современном этапе существующие методики расчета изгибаемых конструкций из тонких стальных профилей с заполнением легким пенобетоном не позволяют с достаточной степенью достоверности оценить их несущую способность и деформативность [10]. Для скорейшего решения данной проблемы необходимо проведение всесторонних научно-теоретических и экспериментальных исследований.

Подобного рода исследования проводятся в России, Украине, Польше [2; 6; 7]. Белорусскими учеными также выполняются научные работы с применением легких бетонов и конструкций. Так, в Полоцком государственном университете были проведены экспериментально-теоретические исследования несущей способности монолитных плит перекрытий с применением тонкостенных стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей с пенобетонным заполнением. Основная задача исследований заключалась в оценке степени влияния пенобетонного заполнения на несущую способность металлических профилей при действии изгибающего момента.

Для проведения эксперимента были изготовлены два опытных образца (плита П-I и плита П-II), отличающихся плотностью пенобетона. Оба образца выполнены с применением одинакового С-образного холоднодеформированного оцинкованного профиля высотой 300 мм (С300), который устанавливался по центру образца. Размеры образцов составляли 300×600×3000 мм. Для моделирования эффекта сплошной монолитной плиты испытываемые образцы обжимались при помощи пружинных зажимов, которые плотно крепились на боковых гранях плит через деревянные подкладки.

Плита П-I изготовлена с применением пенобетона плотностью 500 кг/м³ (D500); плита П-II – с применением двух видов пенобетона D200 в средней части и D500 в сжатой и растянутой зонах. Конструкция опытных образцов и схема приложения нагрузки показаны на рисунке 1.



a – общий вид; *б* – сечение образца плиты П-I; *в* – сечение образца плиты П-II;

1 – профиль С300; 2 – пенобетон D500; 3 – пенобетон D200; 4 – пружинный зажим; 5 – стяжной металлический прут d8; 6 – деревянная подкладка; 7 – тензодатчики; 8 – прогибомер

Рисунок 1. – Конструкция опытных образцов

Испытание опытных образцов проводилось по балочной схеме с приложением сосредоточенных усилий в четырех точках. Нагрузку прикладывали ступенями, каждая из которых не превышала 1/15 предполагаемой расчетной разрушающей нагрузки с выдержкой на этапе 10 минут. В процессе испытания измеряли деформации стальных тонкостенных профилей, прогибы конструкции, ширину раскрытия трещин и их развитие по высоте сечения плиты вплоть до разрушения [11]. Общий вид стенда для испытания плит показан на рисунке 2.

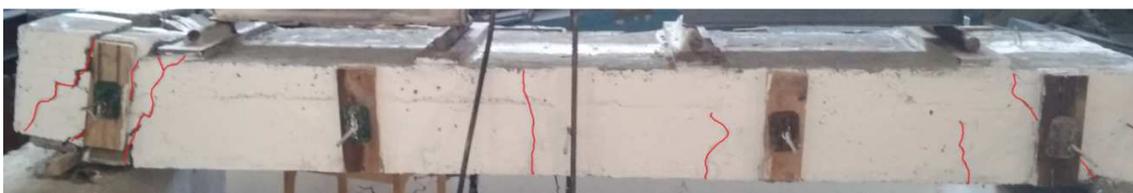


Рисунок 2. – Общий вид стенда для испытания плит

Продольные деформации крайнего волокна сжатой и растянутой зоны профиля измерялись при помощи измерительного комплекса ТЕРЕМ-4. Датчики с базой 120 мм были установлены по центру тонко-

стенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля. Прогибы конструкции измерялись прогибомером 6ПАО с ценой деления 0,01 мм. Ширина раскрытия трещин фиксировалась микроскопом МПБ-2 с 25-ти кратным увеличением и ценой деления 0,05 мм. Деформации и прогибы конструкции измерялись вплоть до исчерпания несущей способности. При этом непосредственно перед разрушением приращения нагрузки на этапах были минимально возможными.

Общий вид плит после исчерпания несущей способности приведен на рисунке 3. В процессе нагружения плиты П-I наблюдалось образование как нормальных, так и наклонных трещин. При нагружении плиты П-II также появлялись трещины, в основном наклонные.

a*б*

a – плита П-I; *б* – плита П-II

Рисунок 3. – Общий вид образцов плит после испытания

Анализ деформаций сжатой и растянутой зоны металлического профиля позволяет сделать вывод о характере взаимодействия металлической балки и пенобетонного заполнителя (рисунок 4).

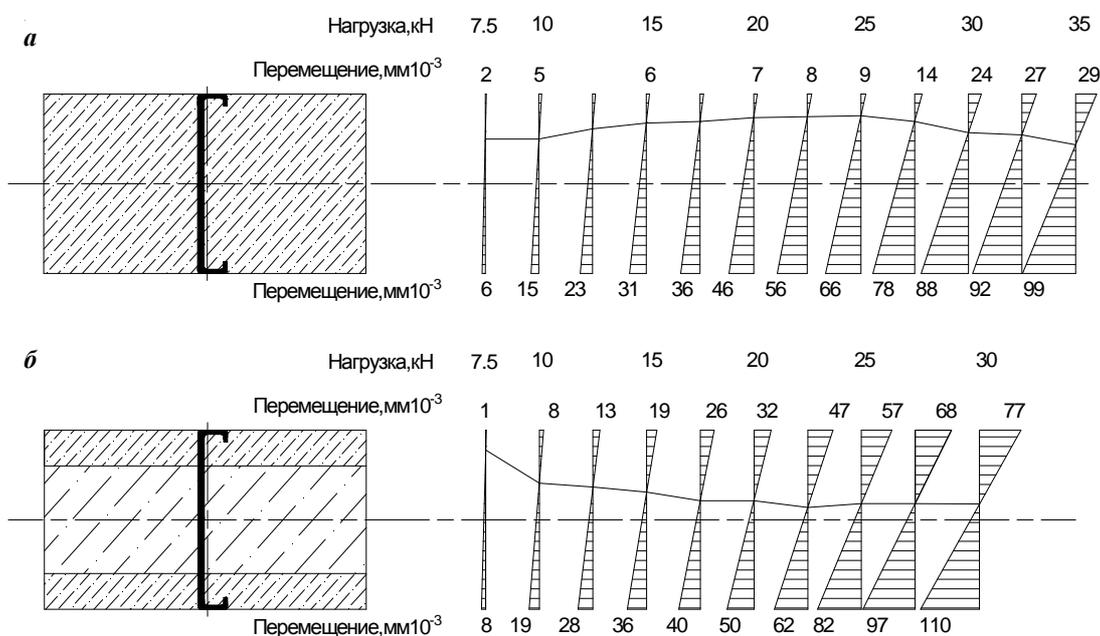


Рисунок 4. – Эпюры деформаций для плиты П-I (*a*); для плиты П-II (*б*)

По мере увеличения нагрузки положение нейтральной оси в образце плиты П-I (рисунок 4, *a*) заметно изменялось. На начальном этапе (до нагрузки 10 кН) деформации растяжения нижних волокон стального профиля превышали деформации сжатия верхних волокон практически в три раза. На этапах загрузки от 10 до 25 кН положение нейтральной оси постепенно перемещалось в сжатую зону, а пре-

вышение деформаций растяжения над деформациями сжатия составило более 7 раз. Такое распределение деформаций по сечению испытываемого образца явно свидетельствует о совместной работе металлического профиля и пенобетона. Как и в традиционных железобетонных конструкциях, в данном образце плиты деформации растяжения воспринимаются металлом профиля, а деформации сжатия – бетоном.

Иная схема распределения деформаций зафиксирована при испытании плиты П-II. Лишь на самом первом этапе загрузки (до нагрузки 10 кН) можно отметить признаки совместной работы монолитного бетона и стального профиля. При дальнейшем увеличении нагрузки положение нейтральной оси все больше смещалось к середине сечения плиты, соответствующей геометрической оси стального профиля. Однако при нагрузке 20 кН и выше положение нейтральной оси практически не изменялось, как не изменялось и при изгибе обычных металлических балок.

На рисунке 5 показаны графики изменения деформаций сжатой зоны стального профиля с ростом нагрузки. На приведенных графиках следует выделить следующие характерные участки: 1 – практически вертикальные участки на самом начальном этапе загрузки; 2 – практически линейный участок до нагрузки 25 кН (только для плиты П-I); 3 – более пологие участки.

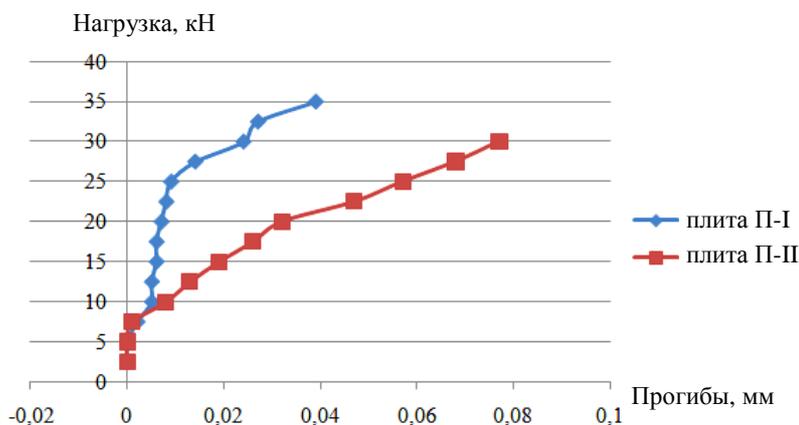


Рисунок 5. – Сравнение деформаций сжатой зоны

Сопоставление полученных данных с характером трещинообразования позволяет сделать вывод о том, что участок 1 соответствует работе плит без трещин, участок 2 – работе плиты с развитием нормальных трещин в пролете. Участок 3 характеризуется нелинейным, скачкообразным развитием сжимающих деформаций верхних волокон профиля. При этом в бетоне плиты зафиксировано интенсивное развитие наклонных трещин. На графике для плиты П-II участок 2 практически отсутствует. При испытании плиты П-II наклонные трещины стали появляться практически на начальном этапе загрузки. Прогибы плиты I и плиты II показаны на рисунке 6.

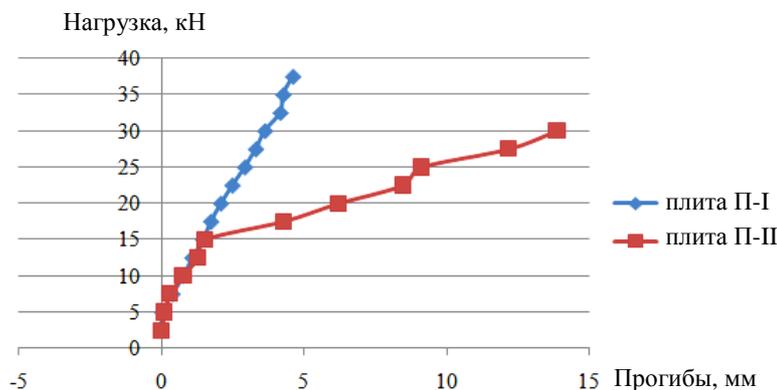


Рисунок 6. – Сравнение прогибов плиты П-I и плиты П-II

Нагрузка при испытаниях плит доводилась до значений, при которых происходило полное разрушение плит. Для плиты П-I разрушающая нагрузка составила 62,5 кН, для плиты П-II – 30 кН. Разрушение образцов в обоих случаях происходило вследствие потери устойчивости стенок и полок стального профиля на опорах.

Описанное выше разрушение плит сопровождалось образованием значительных наклонных трещин, раздроблением бетона в опорной зоне (рисунок 7).



а

б

а – потеря устойчивости стенок и полок стального профиля;
б – образование значительных наклонных трещин и раздробление бетона

Рисунок 7. – Характер разрушения образцов в опорной зоне

Анализ полученных в ходе экспериментальных исследований данных позволяет сделать вывод, что совместная работа стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей и заполнителя из легкого бетона зафиксирована только для образца с пенобетоном марки по плотности D500. В данном случае характер развития деформаций в сжатой и растянутой зонах, схема раскрытия трещин соответствуют работе изгибаемых железобетонных элементов с традиционным армированием.

В образце плиты с заполнением пенобетоном различной плотности (D200 и D500, плита П-II) характер развития деформации сжатой и растянутой зон в целом соответствовал работе металлической балке без заполнения. В данном случае совместная работа профиля и заполнителя из легкого бетона зафиксирована лишь на начальных этапах загрузки. В то же время следует отметить, что пенобетонный заполнитель сыграл существенную роль в обеспечении общей устойчивости тонкостенного профиля, работающего на изгиб. В процессе испытаний плиты П-II вертикальность стенки балки в пролете сохранялась до самого момента разрушения. Потери местной устойчивости полок балки в местах приложения сосредоточенных сил в пролете также зафиксировано не было.

Таким образом, подводя итоги проведенного научного исследования, можно сделать следующие **выводы:**

- 1) применение легких бетонов (пенобетона) в качестве заполнителя конструкций перекрытия, выполненных с применением стальных холоднодеформированных оцинкованных профилей, позволяет существенно повысить их несущую способность;
- 2) при плотности пенобетона D500 совместная работа заполнителя и стальных профилей обеспечивалась практически до момента разрушения образца;
- 3) разрушение образцов в обоих случаях происходило за счет местной потери устойчивости металлического профиля в опорных зонах, сопровождающейся образованием значительных наклонных трещин и раздроблением бетонного заполнителя;
- 4) разрушающая нагрузка для плиты П-I (D500) составила 62,5 кН, для плиты П-II – 30 кН. Существенная разница в значениях разрушающей нагрузки объясняется тем, что в плите П-II с пенобетоном меньшей плотности (D200 в середине сечения и D500 по краям) не удалось обеспечить совместную работу бетонного заполнителя и стального профиля;
- 5) потеря общей устойчивости тонких стальных профилей и местная потеря устойчивости полок в местах приложения сосредоточенных нагрузок в пролете не были зафиксированы как при испытании плиты П-I, так и при испытании плиты П-II.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстровозводимые здания: основные преимущества и недостатки [Электронный ресурс] // Все просто : журнал. – Режим доступа: <http://vseprostoy.ru/byistrovozvodimyye-zdaniya-osnovnyie-preimushhestva-i-nedostatki/>. – Дата доступа: 02.10.2017.

2. Пинскер, В.А. СТО 82866678-3.01.01-2013 / В.А. Пинскер, В.П. Вылегжанин, Н.О. Куликова. – СПб. : АНДРОМЕТА. – 2013. – 8 с.
3. Вербицкий, И.О. Применение металлического профилированного листа в качестве несущего элемента монолитных перекрытий из пенобетона / И.О. Вербицкий // Ползуновский альманах. – 2016. – № 1. – С. 55–58.
4. Быстровозводимые промышленные здания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dvutavr.com.ua/bmz/promyishlennyye-zdaniya>. – Дата доступа: 14.10.2017.
5. Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК): описание, плюсы и минусы, технология строительства [Электронный ресурс] / А. Кирницкая. – Режим доступа: <https://www.syl.ru/article/328996/legkie-stalnyie-tonkostennyye-konstruktsii-lstk-opisanie-plyusy-i-minusyi-tehnologiya-stroitelstva>. – Дата доступа: 28.11.2017.
6. Бронзова, М.К. Конструкция каркасных зданий с применением монолитного пенобетона / М.К. Бронзова, Н.И. Ватин, М.Р. Гарифуллин. – СПб. : С.-Петербург. политехн. ун-т // Сборник. Строительство уникальных зданий и сооружений, 2015. – 77 с.
7. Калафат, К. Противопожарное проектирование легких стальных тонкостенных конструкций / К. Калафат, Л. Вахитова. – Киев : Украинский центр стального строительства. – 19 с.
8. Лундышев, И.А. Почему пенобетон [Электронный ресурс] / И.А. Лундышев. – Режим доступа: http://www.sovbi.ru/ru/penobeton/why_penobeton.php. – Дата доступа: 29.11.2017.
9. ЛСТК и монолитный пенобетон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.profstaldom.ru/lstk-articles/lstk-i-monolitnyj-penobeton/>. – Дата доступа: 15.12.2017.
10. Рыбаков, В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций / В.А. Рыбаков. – СПб. : С.-Петербург. политехн. ун-т, 2011. – 7 с.
11. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости : ГОСТ 8829-94. – Взамен ГОСТ 8829-85 ; введ.01.01.98. – М. : МНТКС, 1998. – 19 с.

Поступила 15.10.2018

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCHES OF THE PLATES MADE OF FOAM CONCRETE AND OF THE THIN-WALLED STEEL COLD-FORMED GALVANIZED SECTION

A. KREMNEV, E. KREMNEVA, R. RADKEVICH

The structure of foam concrete and of the thin-walled steel cold-formed galvanized section prototypes is considered. Structural strength is determined. The picture of crack formation, the graphics of the compressed zone deformations, as well as experimental prototypes deflections are shown. The diagrams of deformations of the compression and tensile zones of the thin-walled steel cold-formed galvanized section are made. The fact of foam concrete and the steel section cooperation in the structure is established.

Keywords: *foam concrete, thin-walled steel cold-deformed profile, joint work, deformation, cracking and structural strength.*

УДК 624.072.221

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛОК С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВЫСОТОЙ СЕЧЕНИЯ**канд. техн. наук, доц. В.Н. МАЛИНОВСКИЙ; Н.В. МАТВЕЕНКО**
(Брестский государственный технический университет)

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных балок с изменяющейся высотой сечения. Данные об особенностях напряженно-деформированного состояния получены по результатам экспериментальных исследований и численного моделирования. Предварительно выполнена верификация численной модели для оценки ее достоверности и соответствия результатов расчета методом конечных элементов опытным данным. Разница в величине разрушающей нагрузки, полученной экспериментально и на основании численного моделирования, составляет не более 10% для всех исследуемых образцов. По результатам анализа напряженно-деформированного состояния установлено, что в коньковом сечении возникает вертикальная составляющая усилий в сжатом бетоне балки. Это приводит к формированию двухосного напряженно-деформированного состояния в местах излома криволинейных балок и создаются условия для образования наклонных трещин в тех частях конструкции, где при данной схеме загрузки поперечная сила не возникает.

Ключевые слова: предварительное напряжение; коньковый узел; численная модель; трещиностойкость; вертикальная составляющая; прогиб.

Введение. Требованиям экономичности, эстетичности и эксплуатации в большей степени отвечают несущие конструкции криволинейного очертания, но в то же время такие конструкции являются более трудоемкими. С целью снижения трудозатрат по изготовлению криволинейные формы конструкций заменяются ломаным очертанием, но в связи с этим зачастую усложняется напряженно-деформированное состояние элемента, а иногда становится неизвестным местоположение опасных сечений по его длине.

В одноэтажных каркасных зданиях основным несущим элементом выступает поперечная рама с шарнирным сопряжением ригеля со стойками для сборных каркасов и жестким для монолитных. Применение жестких узлов в монолитных рамах позволяет использовать ригели ломаного и криволинейного очертания. Как правило, прямолинейные ригели монолитных железобетонных рам применяют при пролетах до 15 м, ломанные и криволинейные ригели без затяжек – до 18 м, с затяжками – до 24 м. Рамы с криволинейными ригелями также используются в качестве диафрагм коротких оболочек.

При проектировании и конструировании рам с криволинейными и ломанными ригелями особое внимание следует уделять узлам и сопряжениям элементов [1]. Узлы примыкания ригеля и стойки в монолитных рамах армируют с учетом величины изгибающего момента и местного действия напряжений в сечениях. В этой связи нижнюю грань ригеля и стойки в зоне узла выполняют со скосом-вугтом, а сжатую арматуру ригеля и стойки заводят вглубь узла, и вут армируют дополнительными продольными стержнями и хомутами [2; 3].

В узлах рам, где ригель имеет перелом по нижней (растянутой) грани усилия, в нижней растянутой арматуре создают равнодействующую, направленную по биссектрисе входящего угла, и, как результат, арматура стремится выпрямиться и откалывает бетон. В этой связи подобного рода узлы армируют с перепуском концов нижних растянутых стержней и усиливают дополнительными поперечными стержнями, воспринимающими растягивающее усилие от вертикальной составляющей усилия в продольных растянутых стержнях [2; 3]. При этом в расчетах, как правило, не учитывается вертикальная составляющая, которая возникает в сжатой зоне бетона в сечениях с переломом по верхней грани балки.

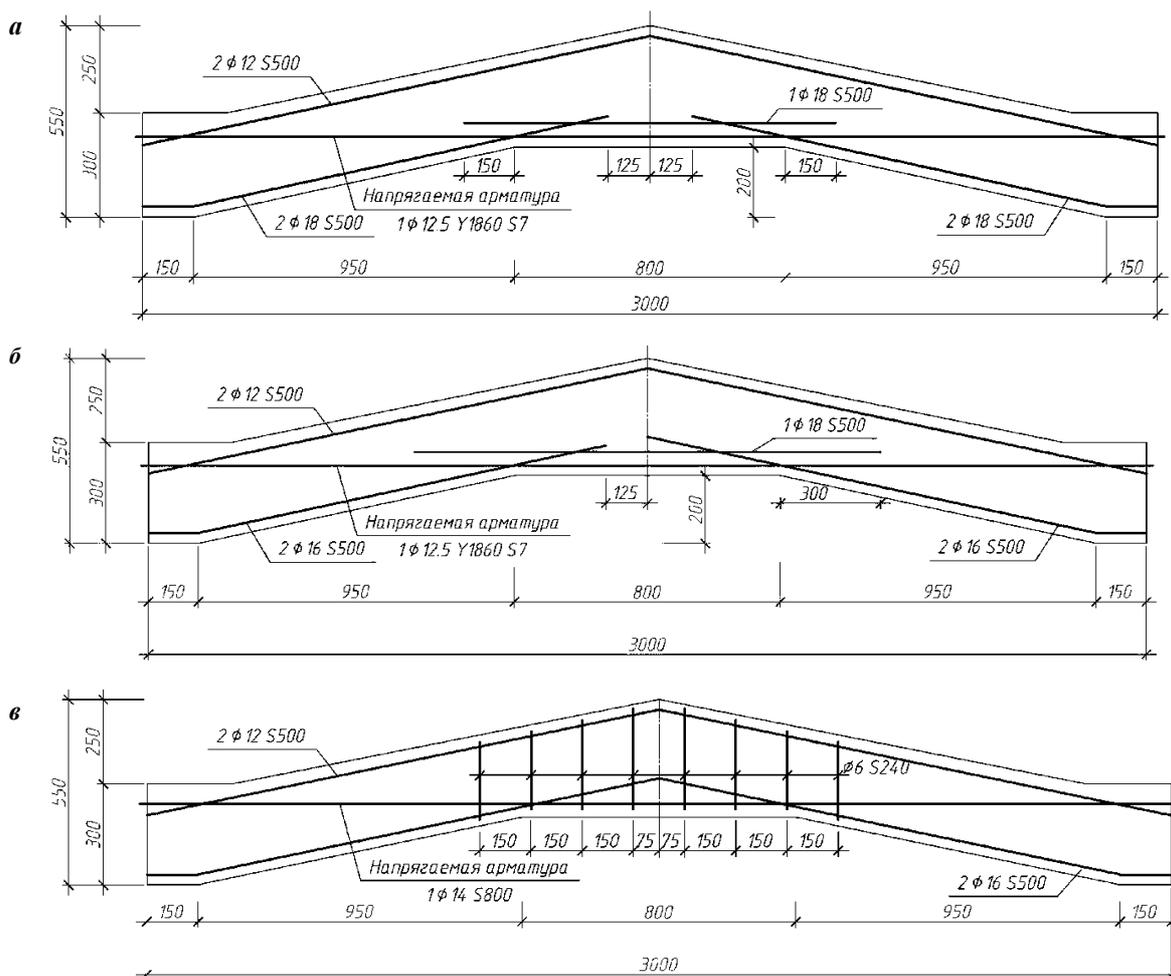
С целью получения более полной информации о характере напряженно-деформированного состояния, трещинообразования и сопротивлении криволинейных балок в местах перелома верхней и нижней граней были выполнены экспериментальные и численные исследования на ЭВМ их напряженно-деформированного состояния [4; 5].

Общая характеристика исследуемых балок

Исследования проводились на образцах-балках длиной 3 м, высота сечения – минимальная 270 мм для наклонной части, максимальная 350 мм в коньке. Ширина сечения по всей длине балки 120 мм.

Более подробная информация о конструктивном решении и армировании моделируемых балок представлена на рисунке 1, информация о примененных в балках материалах и величине предварительного обжатия приведена в таблице 1.

При моделировании искусственного каменного материала (бетона) при расчете на ЭВМ использовалась пластическая модель с вероятностью разрушения («concrete damage plasticity model»). Преимуществом данной модели является возможность учитывать образование и развитие трещин в условиях плоского напряженного состояния.



**а – конструктивное решение образца Б-1; б – конструктивное решение образца Б-2;
в – конструктивное решение образца Б-3**

Рисунок 1. – Конструктивное решение и армирование исследуемых балок

Таблица 1. – Конструктивные характеристики исследуемых балок

Балка	f_{cm}/f_{ctm} , МПа	Напрягаемая арматура	Величина предварительного напряжения, МПа	Поперечная арматура	Вид загрузки
Б-1	37,50/3,36	Ø12,5 Y1860 S7	1226,60	–	2 силы
Б-2	36,70/3,31	Ø12,5 Y1860 S7	1214,15	–	4 силы
Б-3	57,50/4,46	1Ø 14 S800	502,57	2Ø6 S240	4 силы

В основу расчетной диаграммы деформирования бетона при сжатии принята полная диаграмма деформирования согласно рекомендациям [6; 7]. Для описания в расчетах диаграммы деформирования бетона при осевом растяжении приняты аналитические зависимости L. Bertolotti [8], описывающие как восходящую ветвь, так и нисходящую.

Для упрощения математической модели, уменьшения требуемой вычислительной мощности и продолжительности расчета модели полные диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении заменялись на кусочно-линейные, при этом количество линейных участков и характерные точки выбирались таким образом, чтобы расчетная диаграмма графически наиболее точно соответствовала полной диаграмме. Более подробная информация о принятых диаграммах деформирования и базовых параметрах для принятой модели сопротивления бетона (модуль упругости, коэффициент Пуассона, угол дилатации и др.) изложена в более ранних публикациях авторов [9; 10].

Для моделирования материала арматуры была использована упрощенная диаграмма деформирования с двумя линейными участками – зоной упругой работы до характеристического значения предела текучести (условного предела текучести для высокопрочной арматуры) и зоной пластической работы с незначительным упрочнением после достижения предела текучести [6, п. 6.2.1.4; п. 6.2.2.4].

Для обеспечения совместной работы арматуры с бетоном применялась модель взаимодействия материалов на основе сцепления (адгезии) бетона и арматуры («cohesive behavior»). Коэффициент сцепления подбирался таким образом, чтобы по результатам расчета длина зоны передачи предварительного напряжения соответствовала длине зоны анкеровки канатов, определяемым в соответствии с [6, п. 11.3.4 и п. 11.2.32] при характеристиках материалов, использованных в экспериментальных исследованиях.

При анализе напряженно-деформированного состояния образцов железобетонных балок принято разрушение элемента, происходящее при возникновении в анализируемой системе одного из трех критериев:

- 1) относительные деформации бетона сжатой зоны достигают величины, соответствующей предельной сжимаемости бетона $\varepsilon_{cu} = 3,5\%$;
- 2) напряжения в продольной арматуре (сжатой или растянутой) достигают предела текучести (f_{yk}) или 0,1%-ного условного предела текучести ($f_{p0,1k}$);
- 3) касательные деформации бетона над вершиной наклонной трещины достигают предельной величины ε_{ct} .

В качестве критерия трещинообразования принято достижение бетоном деформаций удлинения, соответствующих пиковой точке диаграммы ($\varepsilon_{cr} \geq \varepsilon_{ct}$).

Верификация численной модели

Для оценки достоверности численной модели и соответствия результатов расчета методом конечных элементов опытным данным выбраны следующие параметры сравнения: нагрузка, при которой происходит образование трещин (нормальных и наклонных); характер деформирования при приложении нагрузки (зависимость «изгибающий момент – прогиб»); характер разрушения; величина разрушающей нагрузки.

Таблица 2. – Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований

Балка	Поперечная сила опоре V_{sd} , кН		Изгибающий момент M_{sd} , кН·м	
	при появлении наклонных трещин	при разрушении балок	при появлении нормальных трещин	при разрушении балок
1	2	3	4	5
Б-1	<u>37,5</u>	<u>52,5</u>	<u>20,0</u>	<u>52,5</u>
	35,5	48,3	22,7	48,3
Б-2	<u>40,0</u>	<u>60,0</u>	<u>11,3</u>	<u>45,0</u>
	43,2	57,6	18,0	43,2
Б-3	<u>50,0</u>	<u>95,0</u>	<u>15,0</u>	<u>71,3</u>
	45,0	92,0	22,0	67,6

Примечание. В числителе указаны величины усилий, полученные по результатам экспериментальных исследований, в знаменателе – на основании численного моделирования.

Как видно из таблицы 2, численное моделирование дает результаты, близкие к данным экспериментальных исследований. Величина изгибающего момента, при котором происходит образование нормальных трещин, в моделируемых балках в среднем на 30% выше усилий, измеренных при натурных испытаниях. Полученная разница может быть объяснена погрешностями при определении величины усилий в ходе эксперимента на начальных этапах загрузки из-за неравномерности распределения давления в системе гидравлических домкратов при их последовательном соединении. Более низкий момент трещинообразования для опытной балки Б-2 объясняется более ранним нарушением сцепления напрягаемой арматуры с бетоном и причинами, указанными выше. В графе 2 таблицы 2 представлено сравнение перерезывающих усилий, при которых происходит формирование наклонных трещин в приопорной зоне балки. Разница в величине экспериментальных и полученных методом конечных элементов усилий на данных стадиях загрузки составляет не более 5...10%.

Разрушение опытной балки Б-1 при нагружении двумя силами произошло при нагрузке $2F = 105$ кН в результате смятия сжатой зоны бетона над вершиной образовавшейся в середине пролета балки наклонной трещины. По результатам расчета методом конечных элементов данного образца предварительно напряженной железобетонной балки установлено, что разрушение происходит также в данном сечении при нагрузке $2F = 96,6$ кН.

Загружение балки Б-2 выполнялось четырьмя силами. В ходе натурных испытаний при нагрузке $4F = 120$ кН наблюдалось продергивание напрягаемой канатной арматуры и, как результат – разрушение по наклонной трещине в приопорной зоне. Данная ситуация могла возникнуть из-за недостаточного уплотнения бетона опорной части балки и, как следствие, более раннего нарушения сцепления арматуры с бетоном. Указанные причины не могут быть предусмотрены в численной модели. В связи с этим характер разрушения экспериментальной балки и модели отличен. На основании численных исследований установлено, что разрушение образца Б-2 происходит при нагрузке $4F = 115,2$ кН по наклонной трещине в середине пролета. Характер разрушения опытного образца и численной модели балки Б-3 идентичен – по нормальным сечениям в середине пролета с раздроблением бетона сжатой зоны и потерей устойчивости сжатой арматуры. Разница в величине разрушающей нагрузки, полученной экспериментально и рассчитанной теоретически, составляет 3,2% ($4F = 190$ кН и $4F = 184$ кН соответственно).

Одним из наиболее существенных показателей, характеризующих напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, является кривизна нейтральной оси элемента. Данный показатель позволяет оценить жесткость балки как до образования трещин, так и при работе с трещинами. В связи с этим для каждой из моделируемых балок выполнено сравнение зависимостей «изгибающий момент – относительный прогиб», полученных экспериментально и на основании численных исследований (рисунок 2).

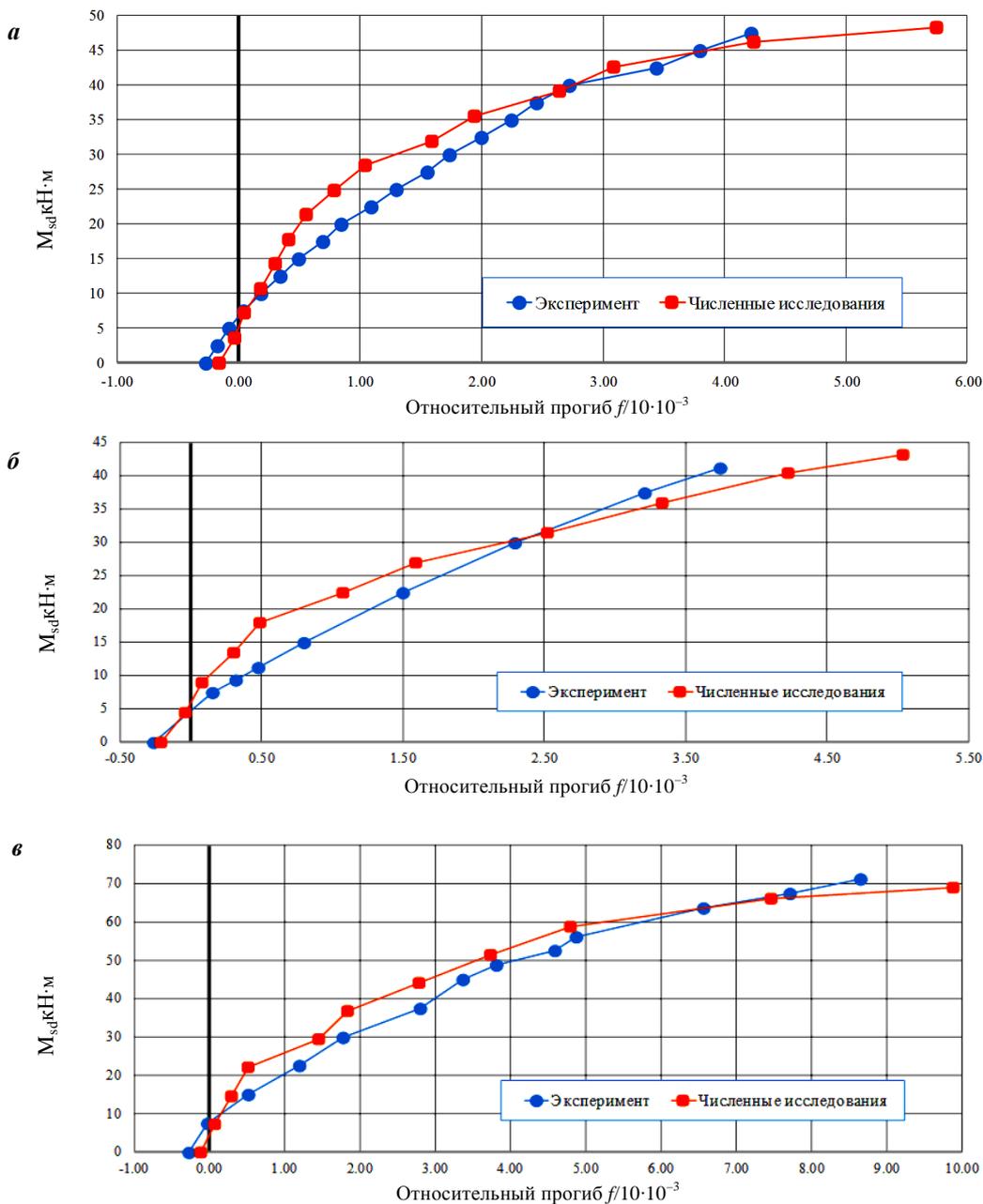


Рисунок 2. – Зависимость «изгибающий момент – прогиб» для исследуемых балок: для балки Б-1 (а); для балки Б-2 (б); для балки Б-3 (в)

Как следует из рисунка 2, результаты расчета образцов методом конечных элементов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Наибольшие различия в величине прогибов отмечены на начальных этапах загрузки при $M_{sd} = 0,20 \dots 0,25 M_u$ (M_u – изгибающий момент при разрушении балок). На последующих этапах кривые экспериментальной и теоретической зависимостей практически совпадают.

Для образца Б-2 разница в полученных двумя способами данных деформативности более существенна. Выражается это в меньшей жесткости опытной балки на стадии работы до образования трещин. Как отмечалось выше, в данном образце при выполнении эксперимента отмечено снижение прочностных и деформативных характеристик зоны контакта напрягаемой арматуры с бетоном, что повлияло на общий характер работы балки и величину прогибов.

Следует отметить одно из преимуществ использования численного моделирования, которое заключается в возможности анализировать напряженно-деформированное состояние конструкций при нагрузках, близких к разрушающим. Как правило, при натурных испытаниях последние показания снимаются за один-два этапа до разрушения. При расчете конструкций методом конечных элементов можно определить необходимые параметры модели непосредственно перед разрушением и даже в момент достижения конструкцией предельного состояния.

Особенности напряженно-деформированного состояния

При проведении испытаний натурных образцов ригелей ломаного очертания отмечен ряд особенностей в напряженно-деформированном состоянии [2]. Особенно важным является то, что в средней части пролета при нагрузках, составляющих 50...60% от разрушающей, на расстоянии 1/3 высоты сечения от нижней грани балки нормальные трещины, образовавшиеся на предыдущих этапах загрузки, изменяли направление в сторону пролетных грузов, формируя тем самым трещины, наклонные к продольной оси. При дальнейшем увеличении нагрузки наблюдается появление и развитие продольной трещины в уровне нейтральной оси конькового сечения и в непосредственной близости от него. Причиной данного явления, по всей видимости, является формирующаяся вертикальная составляющая усилий в сжатом бетоне балки. Последнее обстоятельство особенно явно проявляется в коньке двускатных балок. Для восприятия данного усилия в конструкциях такого типа устанавливается дополнительная вертикальная арматура на участке не более 1/3 высоты сечения в коньке [10; 11].

Для более детального исследования влияния вертикальной составляющей усилий в сжатом бетоне на напряженно-деформированное состояние ломаного ригеля проведены численные исследования и построены изополя главных сжимающих и растягивающих деформаций (рисунок 3).

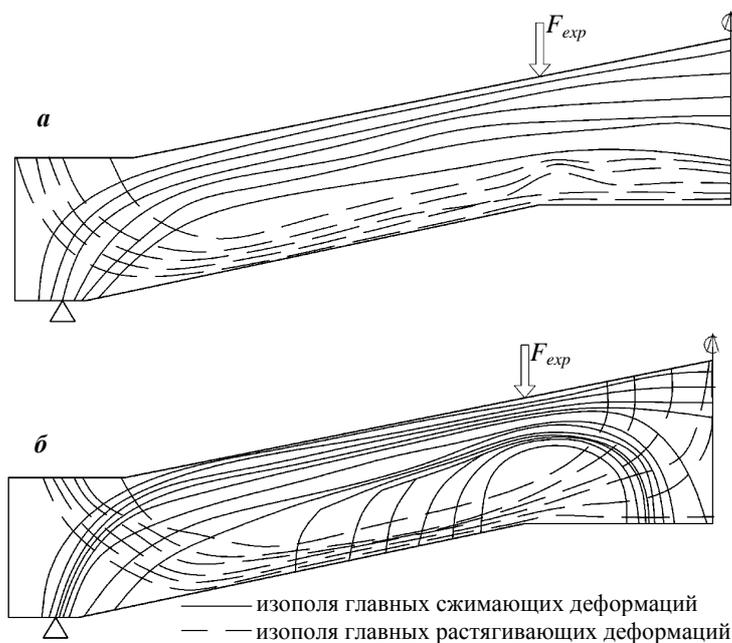


Рисунок 3. – Изополя главных деформаций для криволинейного ригеля до образования нормальных трещин (а), после образования (б)

Примечание. Изополя главных деформаций представлены для балки Б-1. Для двух других образцов схема распределения деформаций имеет тот же характер, отличие заключается только в величине деформаций.

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- 1) экспериментально установлено и численными исследованиями подтверждено, что в местах излома верхней грани криволинейных и ломаных балок от равнодействующей усилия в сжатой зоне бетона возникает вертикальная составляющая, от действия которой происходит отрыв сжатой зоны и формирование двухосного напряженного состояния в средней части балки;
- 2) в результате формирования двухосного напряженно-деформированного состояния в местах излома криволинейных блок создаются условия для образования наклонных трещин, являющихся в большей степени продолжением нормальных, возникших с растянутой грани изгибаемых элементов;
- 3) кривые зависимостей «изгибающий момент – прогиб», полученные экспериментально и вычисленные методом конечных элементов для всех трех образцов, имеют одинаковый вид. Максимальные отклонения в величинах прогибов имеют место на начальных этапах загрузки и не превышают 30%;

4) на основании сравнения результатов, полученных численным моделированием, с экспериментальными данными, установлено, что принятые модели бетона и арматуры, а также взаимодействия (сцепления) бетона с арматурой достаточно точно описывают реальную работу конструкций. Погрешность при определении нагрузки, при которой происходит образование трещин, не превышает 30%, разрушающей нагрузки – 10%;

5) для криволинейных ригелей прямоугольного сечения формирование в коньковом сечении вертикального усилия, способного вызвать отрыв сжатой зоны бетона и образование наклонных трещин, возможно только после появления в этом сечении нормальной трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование железобетонных конструкций : справ. пособие / А.Б. Голышев [и др.] ; под ред. А.Б. Голышева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Київ : Будівельник, 1990. – 544 с.
2. Панарин, Н.Я. Железобетонные конструкции / Н.Я. Панарин, А.П. Павлов, Н.М. Онуфриев. – М. : Высш. школа, 1971. – 554 с.
3. Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона (без предварительного напряжения) – М. : Стройиздат, 1977. – 325 с.
4. Малиновский, В.Н. Синтез механики, свойств материалов и конструктивных особенностей железобетонных стропильных балок / В.Н. Малиновский, П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеевко // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : сб. ст. II Междунар. науч. конф., Брест, 18–20 окт. 2017 г. / БрГТУ ; редкол.: С.М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 110–115.
5. Малиновский, В.Н. Особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных балок ломаного очертания / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеевко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : I Междунар. науч.-техн. конф., 30–31 марта 2017 г. / БрГТУ ; редкол.: С.М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 108–114.
6. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Введ. 20.06.2002. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 143 с.
7. Concrete Structures standard. Part 1 – The Design of Concrete Structures : NSZ 3101-1 (2006). – Concrete Design Committee P 3101, Aug., 2008. – 295 p.
8. Bortolotti, L. First Cracking Load of Concrete Subjected to Direct Tension / L. Bortolotti // ACI Materials Journal. – 1991. – Vol. 88, № 1, Jan. – Feb. – P. 70–73.
9. Малиновский, В.Н. Эффективность железобетонных конструкций при смешанном армировании / В.Н. Малиновский, Н.В. Матвеевко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС» ; редкол.: О.Н. Лешкевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 134–154.
10. Кривицкий, П.В. Математическая модель предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутой арматурой при различных пролетах среза / П.В. Кривицкий, Н.В. Матвеевко // Вестник БрГТУ. – 2018. – № 1(109) : Строительство и архитектура. – С. 92–97.

Поступила 17.12.2018

FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF BEAMS WITH THE CHANGING HEIGHT OF THE CROSS SECTION

V. MALINOWSKI, N. MATVEENKO

The article presents the results of research of the stress-strain state of prestressed beams with varying section height. Data on the features of the stress-strain state were obtained from the results of experimental studies and numerical modeling. Verification of the numerical model was preliminarily performed to assess its reliability and the compliance of the calculation results by the finite element method to experimental data. The difference in the magnitude of the breaking load, obtained experimentally and on the basis of numerical simulation, is not more than 10% for all the studied samples. According to the analysis of the stress-strain state, it was discovered that in the ridge section of the resulting vertical component of the efforts in the compressed concrete beams. This leads to the formation of a biaxial stress-strain state in the place of the curvature. In this way are created conditions for the formation of inclined cracks in those parts of the structure where no shear arises under this loading pattern.

Keywords: pre-stress; ridged node; numerical model; fracture toughness; vertical component; deflection.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 624.012.45

МОДЕЛЬ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ НАПРЯГАЮЩЕГО ФИБРОБЕТОНА

канд. техн. наук, доц. И.П. ПАВЛОВА
(Брестский государственный технический университет)

Представлена модель расширяющегося бетонного композита для прогнозирования величины самонапряжения напрягающего бетона в условиях объемного ограничения. Основные положения модели базируются на постулатах теории эффективной среды и теории упрочняющегося композита. Рассмотрена возможность совместного применения расширяющейся добавки сульфоалюминатного типа и базальтовой фибры для получения химического преднапряжения и повышения прочностных характеристик бетона. Применение базальтовой фибры, введение которой в небольших количествах благодаря распаду на монофиламенты с высокой удельной поверхностью приводит к повышению прочности бетонного композита за счет эффекта 3D-армирования структуры и изменения вязкости разрушения. Количество расширяющейся добавки назначается исходя из позиций достижения необходимого уровня самонапряжения. Максимальное содержание базальтовой фибры ограничивается до 5%, чтобы предотвратить эффект перколяции, но обеспечить формирование условного «пространственного каркаса» из волокон фибры. Предложенная модель позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать самонапряжение – основную энергетическую характеристику напрягающего бетона.

Ключевые слова: напрягающий бетон, базальтовая фибра, теория эффективной среды, модель расширяющегося композита.

При проектировании составов напрягающего бетона основной характеристикой является величина его самонапряжения [1–5]. В работе для определения величины самонапряжения бетона использована трехкомпонентная пространственная модель композита, состоящего из заполнителя, цементной матрицы и расположенной между ними транзитной зоны.

Основные положения модели. При построении модели в данной работе приняты следующие предпосылки:

- расширяющийся композит можно условно представить в виде континуума активной матрицы, в теле которой дискретно расположен пассивный заполнитель;
- рассматриваемая моделируемая система расширяется равномерно по объему без нарушения сплошности контактов.

При прогнозировании процесса расширения для упрощения расчетов в модели использован ряд допущений, не искажающих физический смысл рассматриваемого явления:

- моделируемая система содержит равномерно распределенные по объему матрицы равновеликие шарообразные зерна заполнителя;
- в процессе расчета в качестве пассивной компоненты рассмотрен заполнитель с транзитной зоной вокруг него, для которого согласно основным положениям рассчитывают некоторые усредненные деформативные характеристики;
- базальтовая фибра, распадаясь на монофиламенты, создает пространственное армирование (так называемое 3D-армирование) в бетоне и рассматривается в итоге как ограничивающий элемент с определенными жесткостными характеристиками.

Жесткостные характеристики элементов модели и их изменение во времени. В силу специфики структурообразования расширяющегося композита транзитную зону в дальнейшем рассматриваем как неактивную компоненту, вынужденными деформациями которой с целью упрощения расчетов можно пренебречь. В расчетной модели в качестве заполнителя рассматривается некоторый идеализированный сферический заполнитель с размером зерна, равным размеру зерна заполнителя с транзитной зоной вокруг него, и с усредненными (эффективными), упругими характеристиками (рисунок 1).

Для определения эффективных деформативных характеристик идеализированного моноразмерного заполнителя использованы положения дифференциальной теории эффективной среды (англ. *Differential Effective Medium Theory* – далее D-EMT) [6; 7].

В соответствии с правилами, сформулированными в D-EMT, частица заполнителя с размером \bar{r} и деформативными характеристиками G_{agg}, K_{agg} , помещенная в транзитную зону размером $\bar{r} + \delta_{ITZ}$

с деформативными характеристиками G_{itz} , K_{itz} , заменяется новой эффективной частицей с размером $a = \bar{r} + \delta_{ITZ}$ и соответствующими деформативными характеристиками (модулем сдвига и объемным модулем) G_{id} , K_{id} .

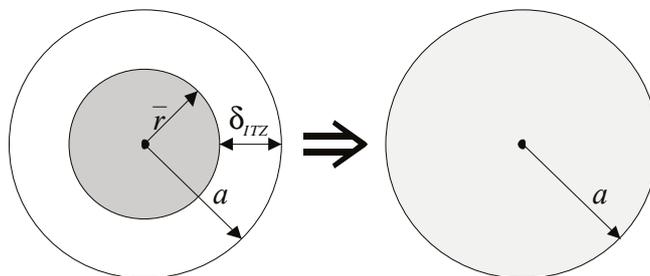


Рисунок 1. – Трансформация композитного включения в эффективную частицу с размером a в соответствии с правилами D-EMT

Для пространственной модели эффективный модуль сдвига G_{id} композитного включения с учетом транзитной зоны находят из решения соответствующего квадратного уравнения:

$$A \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right)^2 + 2B \left(\frac{G_{id}}{G_{itz}} \right) + C = 0, \quad (1)$$

где a , b , c – коэффициенты, предложенные в работе [7].

Эффективный объемный модуль K_{id} для данного «приведенного» заполнителя с учетом свойств транзитной зоны может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$K_{id} = K_{itz} + \frac{p(K_{agg} - K_{itz})}{1 + (1-p) \left[\frac{K_{agg} - K_{itz}}{K_{itz} + \frac{4}{3}G_{itz}} \right]}. \quad (2)$$

Пользуясь зависимостями (1) и (2), рассчитывают характеристики бетона к некоторому фиксированному моменту времени τ (как правило, к возрасту 28 сут), однако процессы структурообразования в расширяющемся композите развиваются во времени, в течение которого в бетоне возникают как силовые, так и несиловые воздействия, приводящие к изменению деформаций системы.

При прогнозировании рассматривается процесс расширения во времени, поэтому следующим допущением является вид функции $E(\tau)$. В настоящих исследованиях использована функция, применяемая для описания упрочняющегося во времени материала:

$$E(\tau) = \beta(\tau) [1 - \delta(\tau)] \bar{E}, \quad (3)$$

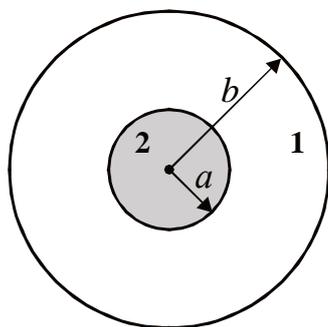
где \bar{E} – модуль упругости материала, установленный без учета эффектов старения при $\beta = 1$ и $\delta = 0$; $\beta(\tau)$ – степень упрочнения материала; $\delta(\tau)$ – степень старения материала. Параметры β и δ варьируются в пределах от 0 до 1 и монотонно возрастают с течением времени.

В работах Laube для описания процессов упрочнения бетонного композита предложена функция $\beta(\alpha)$, описывающая процесс упрочнения материала в зависимости от степени гидратации $\alpha(\tau)$ цементного вяжущего:

$$\beta(\alpha) = \left[\frac{\alpha(\tau) - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right]^{2/3} \geq 0. \quad (4)$$

Напряжения и деформации расширяющейся композитной системы. Для начала рассмотрим наиболее простой с точки зрения реализации решения случай одиночного включения, располагаемого в активной матрице цементного камня. В работе [7] указывается граничная концентрация заполнителя $c_{agg} = 0,05$, при которой не наблюдается эффекта влияния соседних частиц. Для случая изолированного сферического включения, окруженного оболочкой произвольной толщины, погруженного в одно-

родную матрицу (все три фазы имеют некоторые произвольные, условные модули и деформации расширения), получены аналитические решения, позволяющие рассчитать напряженно-деформированное состояние расширяющейся системы. В реальной структуре бетона близкое расположение частиц заполнителя



1 – активная матрица, $a < r < b$;
2 – заполнитель, $0 < r < a$,
где r – радиальная координата

Рисунок 2. – Схематическое представление анализируемой системы

будет играть важную роль, однако на начальном этапе расчета и для случая изолированного заполнителя будут сохраняться все закономерности формирования напряжений и перемещений, свойственных композиту. В данном случае в моделируемой системе рассматриваются только перемещения и напряжения, вызываемые расширением активной матрицы.

Для единичного сферического включения, помещенного в бесконечную активную матрицу, при определении напряженно-деформированного состояния композита использованы стандартные решения осесимметричной задачи с привлечением функции напряжений $airu$. В сферических координатах радиальная компонента перемещения, обозначенная u , будет являться функцией от радиуса r . Тогда три диагональные составляющие тензора деформаций (деформации сдвига равны нулю) будут соответственно следующими: $\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}$, $\varepsilon_{\theta\theta} = \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u}{r}$, где θ и φ – углы в сферических координатах.

В I фазе две независимые составляющие (при $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi}$) тензора деформаций могут быть соответственно записаны как

$$\sigma_{rr} = \left(K_i + \frac{4}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0; \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(K_i - \frac{2}{3} G_i \right) \frac{\partial u}{\partial r} + \left(2K_i + \frac{2}{3} G_i \right) \frac{u}{r} - 3K_i \varepsilon_i^0, \quad (6)$$

где ε_i^0 – свободные деформации расширения i -той фазы.

Для решения дифференциальных уравнений (5), (6) воспользуемся решением Лямэ: для i -той фазы общее решение для радиальной компоненты вектора перемещений $u(r)$ будет иметь вид: $u(r) = \alpha_i r + \frac{\beta_i}{r^2}$, где α_i и β_i – некоторые неизвестные коэффициенты, различные для каждой фазы, определяемые из соответствующих граничных условий. Тогда с учетом принятой функции перемещений, и учитывая, что для заполнителя $\beta = 0$, уравнения (5) и (6) примут вид:

$$\sigma_{rr} = 3K_i \alpha_i + 4G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0; \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 3K_i \alpha_i + 2G_i \frac{\beta_i}{r^3} - 3K_i \varepsilon_i^0. \quad (8)$$

Для нахождения оставшихся неизвестных коэффициентов в уравнениях (7), (8) могут быть приняты следующие условия:

- условия неразрывности перемещений и напряжений на границе раздела «заполнитель – матрица» при $r = a$;

- условие равенства нулю напряжений в радиальном направлении при $r = b$.

С учетом обозначенных граничных условий может быть записана следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_m + \frac{\beta_m}{a^3} - \alpha_{id} = 0; \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{a^3} - K_{id} \alpha_{id} - K_m \varepsilon_m^0 = 0; \\ K_m \alpha_m - \frac{4}{3} G_m \frac{\beta_m}{b^3} - K_m \varepsilon_m^0 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Относительные деформации расширения, развивающиеся в композитной системе, в общем случае будут определены как $\varepsilon_{0,CE} = u(r=b)/b$, или как

$$\varepsilon_{0,CE} = \alpha_m + \frac{\beta_m}{b^3}, \quad (10)$$

где α_m, β_m – коэффициенты, установленные из решения системы (9).

Получив решение для одиночного включения в соответствии с основными положениями D-EMT, выполняют замену существующей системы, состоящей из одиночного включения и активной матрицы (система «первого уровня»), некоторой идеализированной однородной средой, имеющей в процессе расширения относительные деформации $\varepsilon_{0,ce}$ и жесткостные характеристики:

$$K_0 = K_m + K_m k (K_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (11)$$

$$G_0 = G_m + G_m g (G_{id}, K_m, G_m) c + O(c^2), \quad (12)$$

где k и g – безразмерные коэффициенты, зависящие от формы моделируемых частиц и соотношения K_m/K_{id} и G_m/G_{id} .

В соответствии с положениями D-EMT для данной однородной системы часть объема ($c = 0,05$) заменяем наполнителем и находим K_j и G_j , воспользовавшись соответствующими уравнениями. Далее, подставив в систему уравнений (9) соответствующие значения K_m, G_m и $\varepsilon_m^0 = \varepsilon_{0,CE}$, найдем относительную деформацию расширения ε_j ($j = 1, 2, \dots, n$, причем $\sum_{j=1}^n c = c_{agg}$) – «второй уровень».

Так, путем последовательной замены, переходя от уровня к уровню, для реальной концентрации наполнителя c_{agg} определяют текущие значения жесткостных характеристик K, G и относительную деформацию расширения ε композитной системы в момент времени τ . Полученная деформация ε соответствует деформации «свободного» расширения композита ε_{CE} .

Поскольку рассматривается композит, ограничение деформаций расширения которого обусловлено наличием в структуре разветвленной 3D-сетки, состоящей из базальтового волокна (рисунок 3), то для расчета прогнозируемой величины самонапряжения в условиях ограничения идеализированный однородный массив с установленными жесткостными характеристиками и деформацией расширения ε_{CE} помещается в оболочку с жесткостью, эквивалентной жесткости упругого ограничения базальтовой фиброй, косвенно определенной как условный «процент армирования» ρ_f .

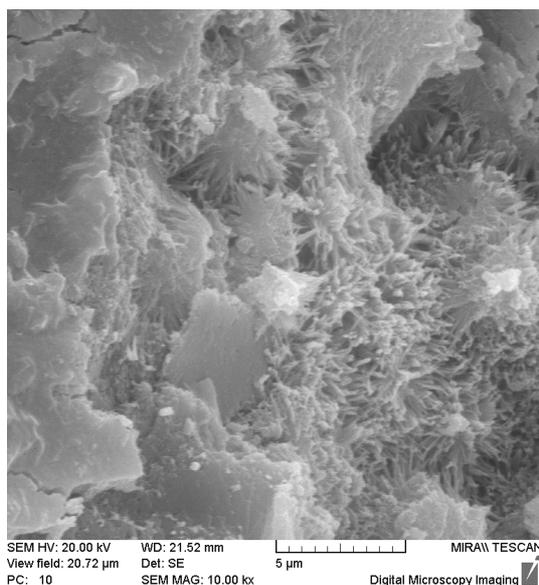


Рисунок 3. – Микроснимок образца цементного камня, модифицированного расширяющейся добавкой и базальтовой фиброй

Для модели «расширяющееся ядро в упругой оболочке», воспользовавшись уравнениями (7) и (8), определена относительная деформация расширения бетона ε_c в условиях внешнего упругого ограничения.

Для случая объемного армирования относительные связанные деформации можно определить по следующей зависимости:

$$\varepsilon_c(\tau) = \frac{1}{1 + \rho_l \frac{K_s}{K_c(\tau)}} \cdot \varepsilon_{TOT}(\tau), \quad (13)$$

где K_c – объемный модуль бетона; K_f – объемный модуль фибры; ε_{TOT} – деформация «свободного» расширения бетона.

Тогда величина самонапряжения для рассматриваемой модели определяется по традиционной формуле, как

$$\sigma_{CE} = \varepsilon_c \rho_l E_f. \quad (14)$$

Отношение прогнозируемой величины самонапряжения к марке по самонапряжению в стандартных условиях ограничения составит:

$$\frac{\sigma_{CE}}{f_{CE,d}} = \frac{1 + \left(\frac{K_f}{K_c}\right)}{1 + \rho_l \cdot \left(\frac{K_f}{K_c}\right)} \cdot \rho_l \cdot 10^2. \quad (15)$$

Для сравнения положений модели были использованы опытные данные [8].

Сравнение опытных данных с данными, получаемыми в результате расчетов по зависимости (15) для случая объемного армирования фиброй, представлено на рисунке 4.

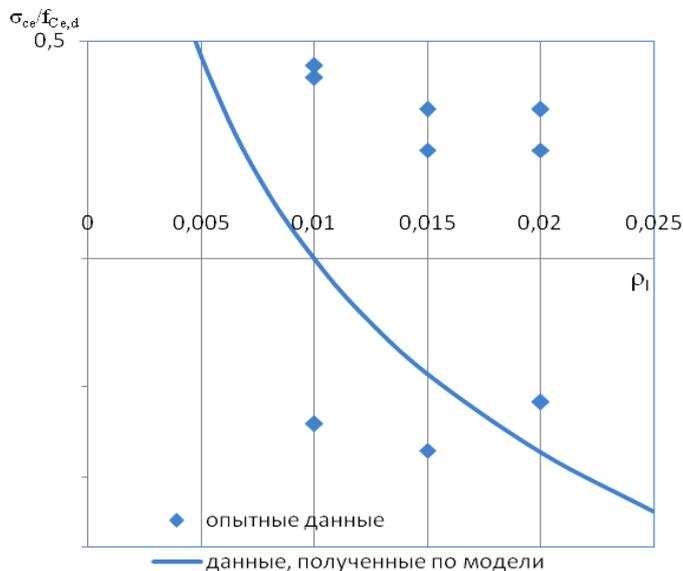


Рисунок 4. – Сравнение опытных данных с прогнозируемыми по модели

Как видно из представленной графической интерпретации зависимостей, несмотря на достаточно обширный разброс экспериментальных данных, модель достаточно адекватно описывает влияние изменения косвенного процента армирования фиброй на величину самонапряжения в условиях объемного ограничения деформаций.

Таким образом, на основании результатов проведенного исследования можно сделать следующие **выводы:**

- к числу несомненных преимуществ модели расширяющегося бетонного композита следует отнести ее универсальность;

- предложенная модель предоставляет возможность рассчитать итоговые деформации и напряжения для различных условий ограничения – модель позволяет получать адекватные характеристики расширения как в условиях одноосного ограничения [6], так и в условиях плоского и объемного ограничений;

- модель расширяющегося бетонного композита более гибко реагирует на изменение входных параметров и позволяет оценить влияние структуры композита на итоговые связанные деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников, К.Г. Природа объемных деформаций при твердении расширяющихся цементов / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина // Физико-химические исследования цементного камня и бетона : сб. тр. ; под ред. А.Е. Десова. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 4–20.
2. Литвер, С.Л. Самонапряженный железобетон и его применение в строительстве / С.Л. Литвер // Опыт и перспективы применения бетонов на напрягающем цементе в строительстве : материалы науч.-техн. совещ. / Центральный Российский Дом знаний. – М., 1992. – С. 12–17.
3. Михайлов, В.В. Расширяющие и напрягающие цементы и самонапряженные конструкции / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М. : Стройиздат, 1974. – 389 с.
4. Панченко, А.И. Критерии оценки расширяющихся вяжущих и бетонов на их основе / А.И. Панченко, Г.В. Несветаев // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений : сб. тр. ; под ред. Н.П. Блещика и В.В. Тура. – Брест : БПИ, 1998. – С. 179–190.
5. Тур, В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В.В. Тур. – Брест : Изд. БПИ, 1998. – 243 с.
6. Павлова, И.П. Приложение теории эффективной среды к моделированию жесткостных характеристик бетонного композита / И.П. Павлова, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – Минск, 2005. – № 3. – С. 3–8.
7. Garboczi, E.J. Elastic Moduli of a Material Containing Composite Inclusions: Effective Medium Theory and Finite Element Computations / E.J. Garboczi, J.G. Berryman // Mechanics of Materials. – 2001. – P. 455–470.
8. Бондаренко, В.М. Соппротивление осевому сжатию сталетрубобетонных элементов круглого сечения с ядром из напрягающего бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / В.М. Бондаренко. – Брест, 2010. – 148 с.

Поступила 07.12.2018

EXPANSIVE CONCRETE COMPOSITE MODEL FOR PREDICTION SELF-STRESS MAGNITUDE IN EXPANSIVE FIBERCONCRETE

I. PAULAVA

In present paper expansive concrete composite model for prediction self-stress magnitude in triaxial restriction conditions are presented. Main model conditions on the basis of Effective Medium Theory and Solidification Theory are founded. In work are considered probabilities of expansive sulfo-aluminate type additive and basalt fiber partnering for chemical prestressing and strength concrete properties increasing. Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to concrete composite strength increase course of 3D-structure reinforcement effect and changing fracture toughness. Amount of expansive additive assign proceeding from achievement of necessary self-stress level. Maximum amount of basalt fiber limit to 5% cause to prevent percolation effect, but to provide formation of filament spatial framework. Proposed model allow with adequate degree of accuracy prognoses main characteristic of self-stressed concrete – self-stressing.

Keywords: self-stressed concrete, basalt fiber, effective medium theory, expansive composite model.

УДК 691.327

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В ПОРОВОЙ СРЕДЕ
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕГО УХОДА****В.В. КРАВЧЕНКО***(Брестский государственный технический университет)*

Приведены основные положения предлагаемой расчетной модели, позволяющей оценивать распределение воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных от внешней среды условиях, учитывая внутренний уход с насыщенным водой пористым заполнителем. В рамках предлагаемой модели представлены результаты моделирования исследуемых процессов.

Ключевые слова: цементный камень, внутренний уход, фильтрация воды, проницаемость, распределение воды.

Под внутренним уходом (англ. – internal curing) подразумевается процесс, при котором гидратация цемента происходит с участием дополнительной воды, доступной для реакций гидратации, но не являющейся частью воды затворения [1].

Внутренний уход предполагает введение в структуру цементной системы специальных резервуаров (источников) дополнительной воды, которая затем в процессе гидратации мигрирует в поровую среду цементного камня, заполняя ее обезвоженные поры и предотвращая развитие процесса «самовысыхания» (англ. – self-desiccation).

Внутренний уход является эффективным способом борьбы с аутогенной усадкой, обусловленной процессом «самовысыхания» в высокоэффективных бетонах. Аутогенная усадка является неотъемлемым свойством бетона, наибольший эффект которой проявляется в изолированных условиях, когда бетон не теряет влагу в окружающую среду, что характерно для плотной структуры высокоэффективных бетонов.

В качестве резервуаров дополнительной воды используют: а) мелкие фракции природных или искусственных легких пористых заполнителей, которые адсорбируют требуемое количество дополнительной воды в своей поровой среде; б) адсорбирующие полимеры, которые адсорбируют требуемое количество дополнительной воды в своей структуре, изменяя при этом свой первоначальный размер.

Один из ключевых параметров процесса внутреннего ухода – распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня от поверхности резервуара, т.е. на какую глубину она способна мигрировать в его поровую среду. Мигрируя в поровую среду цементного камня, дополнительная вода заполняет его обезвоженные поры, располагаемые вокруг резервуара на расстоянии, равном глубине ее миграции, т.е. вокруг каждого резервуара располагается определенный объем цементной матрицы, подверженной внутреннему уходу. Соответственно, объем цементной матрицы, располагаемый на расстоянии, большем, чем то, на которое способна мигрировать дополнительная вода от поверхности резервуара, будет не доступен для внутреннего ухода.

Таким образом, от значения глубины миграции дополнительной воды зависит количество дополнительной воды, мигрирующей в поровую среду цементного камня, предопределяя продуктивность внутреннего ухода в высокоэффективных бетонах.

Распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня можно оценить при моделировании процесса фильтрации дополнительной воды в поровой среде цементного камня. В данной работе моделируется распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в условиях внутреннего ухода с использованием насыщенных водой пористых заполнителей.

Модель фильтрации воды в поровой среде цементного камня. В классическом представлении движение потока жидкости через пористую среду, в которой все поры полностью заполнены жидкостью, описывается законом Дарси:

$$\mathbf{v}_w = -\frac{\mathbf{k}}{\eta_w} \nabla p_w, \quad (1)$$

где \mathbf{v}_w – вектор скорости потока жидкости; \mathbf{k} – тензор абсолютной проницаемости поровой среды 2 ранга; p_w – давление в поровой жидкости; η_w – динамическая вязкость жидкости.

Размер гелевых пор обуславливает тот факт, что основные процессы в цементном камне, происходящие при гидратации (например, процесс «самовысыхания», проявление капиллярного давления), раз-

виваются в основном в капиллярной пористости, поэтому в данной работе моделирование фильтрации влаги в поровой среде цементного камня рассматривается именно в капиллярной пористости.

Вместе с тем необходимо учитывать, что поровая среда цементного камня в процессе гидратации частично заполнена жидкой фазой (свободная и адсорбированная вода) и частично газообразной фазой. В таком случае уравнение закона Дарси может быть представлено в следующем виде [2; 3]:

$$m_w \mathbf{v}_w = -\rho_w \frac{\mathbf{k}_w}{\eta_w} \nabla p_w = -\rho_w \frac{\mathbf{k} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_w, \quad (2)$$

где m_w – количество жидкости в единице объема поровой среды; \mathbf{k}_w – тензор проницаемости для жидкой фазы 2 ранга; $k_{r,w}$ – относительная проницаемость поровой среды для жидкой фазы; ρ_w – плотность воды.

Относительная проницаемость – это отношение фазовой проницаемости (жидкой или газообразной) к абсолютной (базовой) проницаемости поровой среды:

$$k_{r,w} = \frac{k_w}{k},$$

где k_w – проницаемость поровой среды для жидкой фазы; k – абсолютная проницаемость поровой среды.

Для нахождения коэффициента относительной проницаемости для жидкой фазы можно использовать следующую зависимость [2; 3]:

$$k_{r,w} = \sqrt{S_{w,p}} \cdot \left(1 - \left(1 - S_{w,p}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2,$$

где $S_{w,p}$ – степень насыщения (заполнения) поровой среды цементного камня влагой; m – параметр, определяемый экспериментально на основе изотерм сорбции исследуемого пористого материала, принятый по данным [3] равным 0,5.

Процесс фильтрации в поровой среде цементного камня может быть описан уравнениями неразрывности (непрерывности), выражающими закон сохранения массы в элементарном объеме поровой среды [2; 3]:

$$\text{- для жидкой фазы:} \quad \frac{\partial m_w}{\partial \tau} + \nabla \cdot (m_w \mathbf{v}_w) = -\frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau} - \frac{\partial m_{hyd}}{\partial \tau} + \frac{\partial m_{w,ic}}{\partial \tau}; \quad (3)$$

$$\text{- для газообразной фазы:} \quad \frac{\partial m_g}{\partial \tau} + \nabla \cdot (m_g \mathbf{v}_g) = \frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где $\frac{\partial m_{vap}}{\partial \tau}$ – интенсивность стока (источника) в результате процесса парообразования; $\frac{\partial m_{hyd}}{\partial \tau}$ – интенсив-

ность стока в результате процесса гидратации; $\frac{\partial m_{w,ic}}{\partial \tau}$ – интенсивность источника в результате процесса

внутреннего увлажнения; m_g – количество газа в единице объема поровой среды цементного камня;

\mathbf{v}_g – вектор скорости потока газа.

При моделировании процесса фильтрации в поровой среде цементного камня приняты следующие предпосылки и допущения:

- цементный камень является изотропной средой;
- при твердении в изолированных условиях интенсивностью стока в результате процесса парообразования пренебрегают;
- в поровой среде в процессе гидратации находится свободная вода и вода, адсорбированная на стенках капилляров;
- потребление воды из поровой среды в процессе гидратации происходит за счет образования химически связанной воды и воды цементного геля;
- давлением газообразной фазы в поровой среде пренебрегают, поскольку, по данным [2], в слабо-проницаемых пористых материалах оно не превышает значения атмосферного давления;
- плотность химически связанной воды, воды цементного геля и воды, адсорбированной на стенках капилляров, принимают равной плотности обычной воды.

Основываясь на сформулированных выше предпосылках и допущениях, уравнение неразрывности потока для жидкой фазы можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w (V_{w,c} + V_{w,ads})) + \nabla \cdot (m_w \mathbf{v}_w) = - \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w (V_{w,ne} + V_{w,g})) + \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_w V_{w,ic}), \quad (5)$$

где $V_{w,c}$ – относительный объем свободной воды в цементном камне; $V_{w,ads}$ – относительный объем адсорбированной воды в цементном камне; $V_{w,g}$ – относительный объем воды цементного геля в цементном камне; $V_{w,ne}$ – относительный объем химически связанной воды в цементном камне; $V_{w,ic}$ – относительный объем дополнительной воды от внутреннего ухода в цементном камне.

Подставляя (2) в (5), получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,c} + V_{w,ads}) + \nabla \cdot \left[- \frac{k \mathbf{I} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_w \right] = - \frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,ne} + V_{w,g}) + \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}, \quad (6)$$

где \mathbf{I} – единичный тензор 2 ранга.

Для цементной системы, твердеющей в изолированных условиях, можно записать следующее уравнение баланса объемов воды в произвольный момент времени от начала твердения:

$$V_{w,0} = V_{w,c} + V_{w,ne} + V_{w,g} + V_{w,ads}, \quad (7)$$

где $V_{w,0}$ – начальный относительный объем воды (воды затворения) в цементном камне.

Исходя из уравнения (7) справедливо выражение:

$$\frac{\partial V_{w,0}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} (V_{w,c} + V_{w,ads} + V_{w,ne} + V_{w,g}) = 0. \quad (8)$$

Поскольку давлением газообразной фазы p_g в поровой среде пренебрегают, давление в поровой жидкости p_w принимают равным капиллярному давлению p_c , действующему в поровой среде:

$$p_w = p_g - p_c \approx -p_c. \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в (6), получим окончательный вид уравнения, описывающего процесс фильтрации влаги в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных условиях, с учетом дополнительной воды от внутреннего ухода:

$$\nabla \cdot \left[\frac{k \mathbf{I} k_{r,w}}{\eta_w} \nabla p_c \right] = \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}. \quad (10)$$

Модель проницаемости цементного камня. Ключевым параметром в уравнении Дарси является коэффициент проницаемости поровой среды, характеризующий возможность фильтрации в ней потока жидкости или газа.

В данной работе коэффициент проницаемости поровой среды цементного камня определяют на основании модели, предложенной в работе [4], основанной на теории эффективной среды:

$$\frac{(1 - \phi_c) \cdot (k_l - k)}{k_l + A \cdot k} + \frac{\phi_c \cdot (k_h - k)}{k_h + A \cdot k} = 0; \quad (11)$$

$$A = \frac{1 - \phi_{c,cr}}{\phi_{c,cr}}, \quad (12)$$

где ϕ_c – относительный объем капиллярной пористости в цементном камне; k_l – коэффициент проницаемости низкопроницаемой фазы цементного камня; k_h – коэффициент проницаемости высокопроницаемой фазы цементного камня; $\phi_{c,cr}$ – наименьший относительный объем капиллярной пористости, при котором наблюдается перколяция пор, принимаемый равным $0,18 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [4].

Коэффициент высокопроницаемой фазы цементного камня, к которой относят капиллярную пористость, определяют как

$$k_h = \frac{1,8 \cdot (1 - \phi_{c,cr})^2}{226} \cdot r_{p,c}^2. \quad (13)$$

В выражении (13) $r_{p,c}$ – радиус пор, соответствующий экстремальному значению на дифференциальной кривой распределения капиллярной пористости.

Коэффициент низкопроницаемой фазы цементного камня, к которой относят пористость цементного геля, определяют по следующей зависимости:

$$k_f = k_{CSH} \cdot \left(1 - \frac{1 - V_{hp,CSH}}{1 - V_{hp,CSH}^{per}} \right)^2, \quad (14)$$

где k_{CSH} – коэффициент проницаемости цементного геля, принимаемый равным $7 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2$ [4]; $V_{hp,CSH}$ – относительный объем цементного геля в цементном камне; $V_{hp,CSH}^{per}$ – относительный объем цементного геля в цементном камне в момент перколяции.

На рисунке 1 представлен результат моделирования коэффициента проницаемости поровой среды цементного камня в процессе твердения, полученный по модели [4] при различных значениях водоцементного отношения (В/Ц).

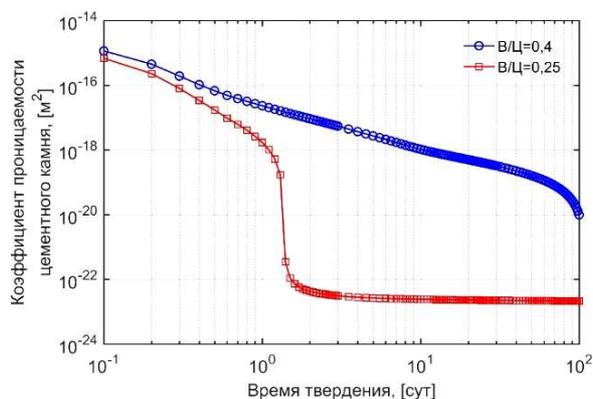


Рисунок 1. – Изменение коэффициента проницаемости цементного камня в процессе твердения (рассчитано по исходным данным [5])

Моделирование распределения воды в поровой среде цементного камня. Наиболее удобно оценивать распределение дополнительной воды в поровой среде цементного камня через изменение степени насыщения пор влагой $S_{w,p}$ в пределах предполагаемой (ожидаемой) глубины миграции дополнительной воды l_{mig} , путем решения дифференциального уравнения (10). Под степенью насыщения пор цементного камня влагой следует понимать отношение объемного количества жидкой фазы в его поровой среде (свободной и адсорбированной воды, а также дополнительной воды, полученной в результате внутреннего увлажнения) к общему объему пор.

Расчетная область, для которой находят решение дифференциального уравнения (10), представляет собой трехмерное пространство Ω , ограниченное двумя сферами радиусами

$$r_1 = M[r_{lwa}] \text{ и } r_2 = M[r_{lwa}] + l_{mig}.$$

Здесь $M[r_{lwa}]$ обозначает математическое ожидание величины радиуса гранул пористого заполнителя. Данная пространственная область Ω имитирует объем цементной матрицы, располагаемый вокруг гранулы пористого заполнителя в пределах предполагаемой глубины миграции дополнительной воды l_{mig} .

Поскольку рассматриваемая пространственная область Ω является осесимметричной, а цементный камень – изотропной средой, это позволяет рассмотреть решение дифференциального уравнения (10) в двумерной расчетной области (рисунок 2).

Для построения двумерной расчетной области используют исходные данные по предполагаемой глубине миграции дополнительной воды l_{mig} и математическому ожиданию величины радиуса гранул пористого заполнителя $M[r_{lwa}]$.

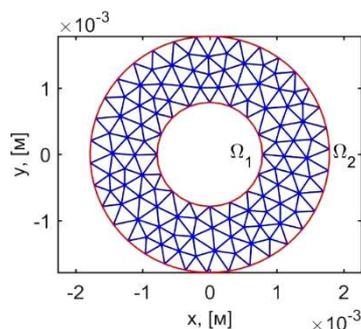
В двумерной области дифференциальное уравнение (10) можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial S_{w,p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C \frac{\partial S_{w,p}}{\partial y} \right) = f; \quad C = \frac{k \cdot k_{r,w}}{\eta_w} \cdot \frac{\partial p_c}{\partial S_{w,p}}; \quad f = \frac{\partial V_{w,ic}}{\partial \tau}. \quad (15)$$

Представляя исследуемое время твердения в виде равномерной временной сетки $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta\tau$ (здесь $\Delta\tau$ – временной шаг; i – произвольный узел сетки), для дифференциального уравнения (15) принята следующая схема аппроксимации:

$$\nabla \cdot [C_i \nabla (S_{w,p})_{i+1}] = f_i, \quad (16)$$

где $C_i = C(\tau_i)$ и $f_i = f(\tau_i)$, определяемые по (15).



Ω_1 , Ω_2 – соответственно внутренняя и внешняя границы расчетной области

Рисунок 2. – Двухмерная расчетная область решения дифференциального уравнения (10) с сеткой метода конечных элементов для фракции пористого заполнителя 1,18...2,36 мм и предполагаемой глубины миграции влаги 1 мм

Для нахождения решения дифференциального уравнения (16) в двухмерной расчетной области применяют метод конечных элементов, граничным условием при решении которого служит условие Дирихле:

$$(S_{w,p})_{i+1} \Big|_{\Omega_i} = S_{w,p}(\tau_{i+1}), \quad (17)$$

где Ω_i – внутренняя граница двухмерной расчетной области.

В качестве фактического значения глубины миграции влаги принимают значение, при котором степень насыщения пор влагой на внутренней и внешней границе расчетной области на протяжении всего исследуемого временного интервала будет отличаться не более чем на заданную величину. В практических расчетах значение этой величины рекомендуется принимать равным не более 10%.

На рисунке 3 представлен результат моделирования степени насыщения пор цементного камня влагой в процессе твердения, полученный при решении дифференциального уравнения (15) в двухмерной расчетной области для фракции пористого заполнителя 1,18...2,36 мм и предполагаемой глубины миграции влаги 1 мм.

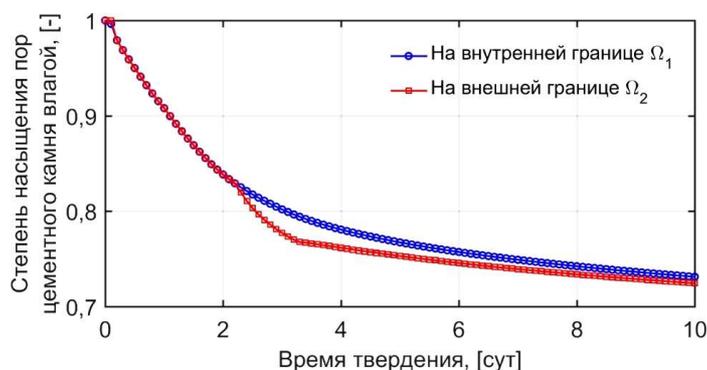


Рисунок 3. – Изменение степени насыщения пор влагой в цементном камне с учетом внутреннего ухода в процессе твердения в изолированных условиях (рассчитано по исходным данным [7])

Необходимые параметры $S_{w,p}$, p_c , $V_{w,ic}$ и другие для определения коэффициентов дифференциального уравнения (15) рассчитаны по методике, приведенной в работе [6].

Заключение. На основании результатов проведенного исследования представлены основные положения предлагаемой расчетной модели, которая позволяет оценивать распределение воды в поровой среде цементного камня, твердеющего в изолированных условиях с учетом внутреннего ухода с насыщенным водой пористым заполнителем.

Показано, что основным фактором, оказывающим существенное влияние на глубину миграции дополнительной воды в поровую среду цементного камня, является ее абсолютная проницаемость, которая, в свою очередь, исходя из результатов численного моделирования, зависит от водоцементного отношения.

Значительное снижение абсолютной проницаемости поровой среды цементного камня, наблюдаемое при низких значениях водоцементного отношения в первые сутки твердения, обуславливает существенное различие в значениях степени насыщения пор влагой на внешней и внутренней границе двухмерной расчетной области. Вместе с тем, как видно из результатов моделирования, после резкого уменьшения абсолютной проницаемости при низких значениях водоцементного отношения в начальный период твердения, в дальнейшем её изменение происходит не столь интенсивно. По-видимому, этот факт, а также увеличение капиллярного давления в процессе твердения, обусловленное процессом «самовысыхания» цементного камня объясняет то, что впоследствии значение степени насыщения пор влагой на внешней границе расчетной области постепенно приближается к значению на внутренней границе.

Таким образом, на основании результатов моделирования, делаем вывод, что первые сутки твердения цементного камня являются ключевым моментом времени при определении глубины миграции дополнительной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Light-weight Aggregate : ACI Committee 308 / American Concrete Institute. – ACI, 2013. – 12 P. – ACI (308-213) R-13.
2. Coussy, O. Poromechanics / O. Coussy. – Chichester : John Wiley & Sons, 2004. – 312 p.
3. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials / O. Coussy [et al.] // Materials and Structures. – 2004. – Vol. 37, iss. 1. – P. 15–20.
4. Cui, L. Permeability and pore structure of OPC paste / L. Cui, J.H. Cahyadi // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol. 31, iss. 2. – P. 277–282.
5. Tazawa, E. Prediction Model for Autogenous shrinkage of concrete with different type of cement / E. Tazawa, S. Miyazawa // Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology : Proceedings 4th International Seminar, Gaithersburg, 20 June 2005 / National Institute of Standards and Technology ; ed.: B. Persson, D. Bentz, L. Nilsson. – Gaithersburg, 2005. – P. 125–139.
6. Кравченко, В.В. Моделирование параметров состояния поровой среды цементного камня в рамках концепции «внутреннего увлажнения» / В.В. Кравченко // Вестник Полоц. гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 28–41.
7. Lura, P. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete / P. Lura. – Delft : Delft University Press, 2003. – 180 p.

Поступила 17.12.2018

MODELING OF WATER DISTRIBUTION IN THE POROUS MEDIA CEMENT PASTE WITH INTERNAL CURING

V. KRAVCHENKO

The theoretical aspects proposed model the water distribution in the porous media cement paste hardened in sealed condition with internal curing using presoaked lightweight aggregates are described, including the results of modeling.

Keywords: cement paste, internal curing, water transport, intrinsic permeability, water distribution.

УДК 691:035.267

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ****А.В. ДОЛЖОНОК; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)**

Приведены сведения по применению соломы зерновых культур и костры льна в производстве стеновых строительных материалов. Рассмотрены результаты выполненных исследований по определению теплофизических характеристик стеновых материалов на основе заполнителей из соломы и костры льна при натурных испытаниях. Проанализированы полученные зависимости распределения температур в наиболее холодный период зимнего сезона. Определена зависимость распределения влажности по толщине стеновых материалов после окончания зимнего периода испытаний. Исследована удельная теплоемкость разработанных стеновых блоков и установлена зависимость данной характеристики от температуры в диапазоне от -25 до $+60$ °С.

Ключевые слова: стеновые материалы, солома, костра льна, блоки, влажность, растительное сырье, удельная теплоемкость, влажность, натурные испытания, тепловой поток.

Введение. Важной задачей в строительстве является не только наращивание темпов производства строительных материалов, но и повышение эффективности использования при возведении зданий. По причине сокращения отдельных природных ресурсов необходим поиск новых экологически чистых источников сырья, в частности отходов растениеводства. На сегодняшний день растениеводство, включая выращивание зерновых культур и льна, занимает существенный сегмент в производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь. По данным статистического ежегодника [1] в Республике Беларусь в 2017 году посевные площади зерновых культур составили около 2,43 млн гектаров, льна-долгунца – 47 тыс. гектаров.

Один из способов утилизации соломы – измельчение и разбрасывание по полю с последующей запашкой для восстановления плодородия земель, что приводит к засорению почвы сорняками [2]. Основная часть соломы используется для корма скоту, а также в качестве подстилочного слоя на животноводческих фермах. Использование соломы в виде корма требует предварительной обработки для улучшения питательных качеств, что влечет за собой дополнительные затраты и становится нецелесообразным. Также солома сжигается на полях, что увеличивает выброс парниковых газов в атмосферу и ухудшает экологическую обстановку. Однако использование растительных сельскохозяйственных отходов в качестве заполнителей для стеновых материалов выступает как перспективное и рациональное направление.

Так, известна технология изготовления арболита на основе костры льна и цементного вяжущего [3]. Прочность материала при 10%-ной линейной деформации составляет 0,78...0,95 МПа, теплопроводность – 0,125...0,154 Вт/(м·°С) при плотности 450...510 кг/м³.

В Российской Федерации (Нижний Новгород) разработана технология производства костробретона для малоэтажного монолитного домостроения. Основными компонентами в экспериментальных составах являлись гипсоцементное вяжущее и костра льна [4]. Предложенное технологическое решение позволяет получить костробретон с плотностью 630...980 кг/м³ и пределом прочности на сжатие 0,8...4,4 МПа.

Французскими учеными проводятся исследования биокомпозитных материалов на основе растительного заполнителя из соломы рапса и дробленого ствола подсолнуха [5]. Вяжущим компонентом в разработанном составе выступает глина. При плотности биокомпозита из соломы рапса 250...420 кг/м³ коэффициент теплопроводности составляет 0,07...0,08 Вт/(м·°С). Применение дробленого ствола подсолнуха приводит к увеличению плотности до 400...580 кг/м³ и коэффициента теплопроводности до 0,1...0,14 Вт/(м·°С).

Рисовую солому используют как заполнитель при производстве дешевых строительных блоков для возведения жилья в Египте [6]. Вяжущим компонентом для изготовления стенового материала служит цемент. Тепловые испытания показали, что блоки возможно использовать не только как стеновой материал, но и как изоляционный в условиях жаркого климата.

В Таджикистане применяется технология получения стеновых блоков на основе дробленых стеблей хлопчатника [7]. При изготовлении стенового материала в качестве вяжущего используется портландцемент. Блоки имеют прочность на сжатие 2,9 МПа, коэффициент теплопроводности равен 0,116 Вт/(м·°С) при плотности 600 кг/м³. Жидкое стекло и хлористый кальций используются для предотвращения воздействия на цемент легкорастворимых веществ, содержащихся в стеблях хлопчатника.

В Беларуси на кафедре строительного производства Полоцкого государственного университета разработан стеновой материал в виде блоков на основе соломы и соломы с кострой льна. Стеновые блоки при плотности 530 кг/м³ обеспечивают прочность на сжатие 2...2,2 МПа и имеют коэффициент теплопроводности, равный 0,075...0,085 Вт/(м·°С) [8]. По результатам исследований получен патент № 21884 на состав костросоломенных стеновых блоков [9].

В процессе эксплуатации зданий количественное содержание влаги в материалах ограждающих конструкций изменяется в зависимости от конструктивных особенностей, свойств материалов, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства. Влажностный режим определяет эксплуатационно-технические характеристики ограждающих конструкций здания, в том числе долговечность, а также непосредственно влияет на теплозащитные свойства ограждающих конструкций и энергоэффективность применяемых материалов. Данному вопросу в последнее время уделяется все большее внимание, так как результаты исследований влияния влаги на эксплуатационные характеристики становятся определяющим фактором при выборе и применении того или иного теплоизоляционного материала при строительстве зданий.

Методика испытаний. При проведении испытаний стеновых блоков на основе соломы и соломы с кострой льна в условиях эксплуатации измерение температуры окружающего воздуха и поверхности испытываемых образцов осуществлялось с помощью термопар, показателей теплового потока – с применением преобразователей теплового потока, подключенных к прибору РТП-1-16Т. Измерения проводили через каждые 90 секунд. Температуру воздуха в помещении поддерживали на постоянном уровне 20 ± 2 °С, а относительную влажность воздуха – в пределах 55...65%.

За испытуемый образец принимали стеновой блок с размерами $400 \times 300 \times 200$ мм. Для определения температур в толще материала каждый образец условно разделяли на 4 участка толщиной по 75 мм, на границе участков устанавливали термопары (рисунок 1).

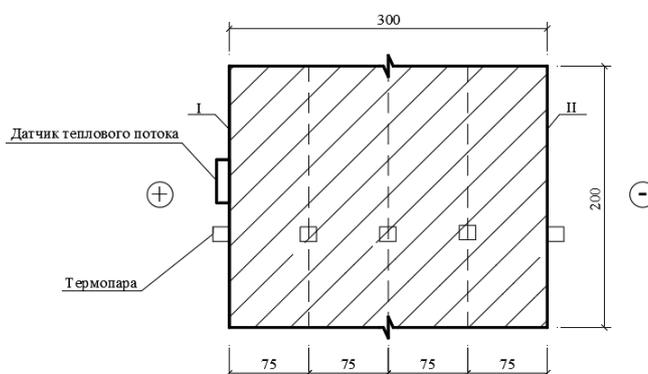


Рисунок 1. – Схема расположения датчиков внутри и на поверхности блока

Влажность стенового материала после испытаний в условиях эксплуатации определяли прямым методом – путем взвешивания вырезанных из блоков образцов размером $100 \times 100 \times 300$ мм (рисунок 2). Длина образца в 300 мм является шириной стенового блока. Полученный образец по длине распиливали поперек волокон на 5 фрагментов толщиной 60 мм. Каждый фрагмент взвешивали, затем высушивали до постоянной массы и определяли влажность по ГОСТ 12730.2 [10].

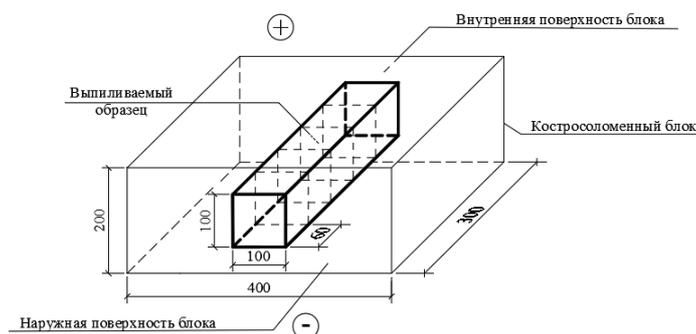
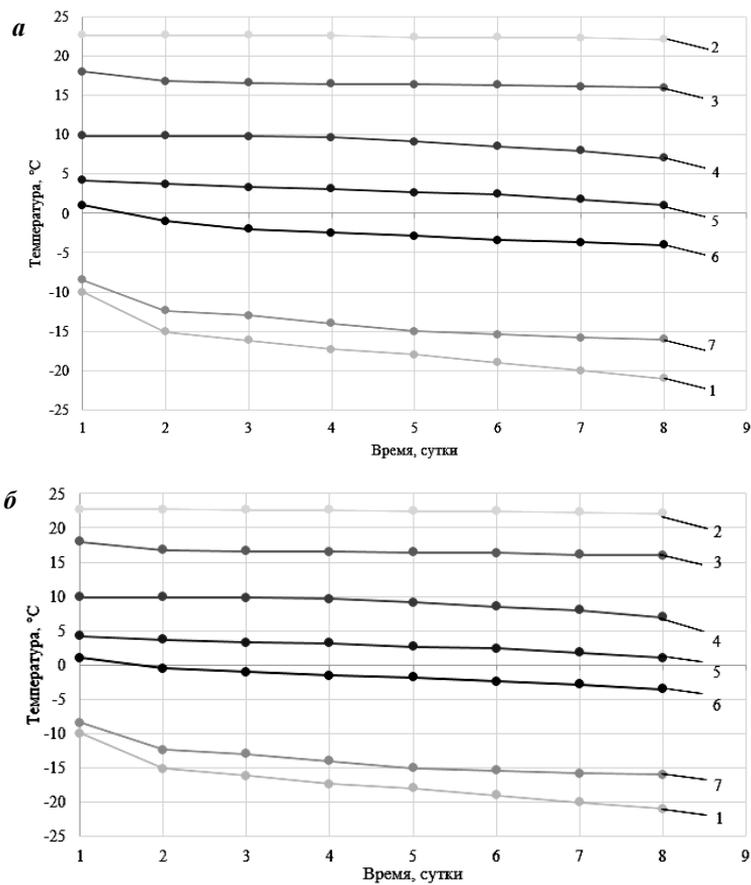


Рисунок 2. – Образец, выпиленный из стенового блока

Определение удельной теплоемкости стеновых материалов производилось с помощью измерителя теплоемкости ИТ-с-400. При проведении измерений испытуемый образец, имеющий форму цилиндра, диаметром 15 и высотой 10 мм, помещали внутрь металлической ампулы, накрывали колпачком и разогревали с помощью нагревателя, размещенного в измерителе теплоемкости. Тепловой поток поступал к ампуле через тепломер. Открытые участки поверхности ампулы изолировали от внешней среды адиабатической оболочкой, чтобы тепловая связь ампулы и образца осуществлялась только через тепломер. Исследования проводились в температурном диапазоне от -40 до $+50$ °С со скоростью нагрева 6 К/мин.

Экспериментальные исследования. Определение температур, показателей тепловых потоков, влажности материала выполняли на костросоломенных и соломенных блоках, находящихся в кладке наружных стен толщиной 300 мм одноэтажного жилого здания.

По результатам проведенных испытаний в зимний период на рисунке 3 представлено распределение температур по толщине стеновых ограждающих конструкций с соломенными и костросоломенными блоками. Значения температур приняты как средние величины показаний температур с 19 часов вечера до 9 часов утра в период с 20 по 27 февраля 2018 года.



- 1 – температура наружного воздуха, °С; 2 – температура внутреннего воздуха, °С;
 3 – температура на поверхности I стенового блока, °С;
 4 – температура блока на расстоянии 75 мм от поверхности I, °С;
 5 – температура блока на расстоянии 150 мм от поверхности I, °С;
 6 – температура блока на расстоянии 225 мм от поверхности I, °С;
 7 – температура блока на поверхности II, °С

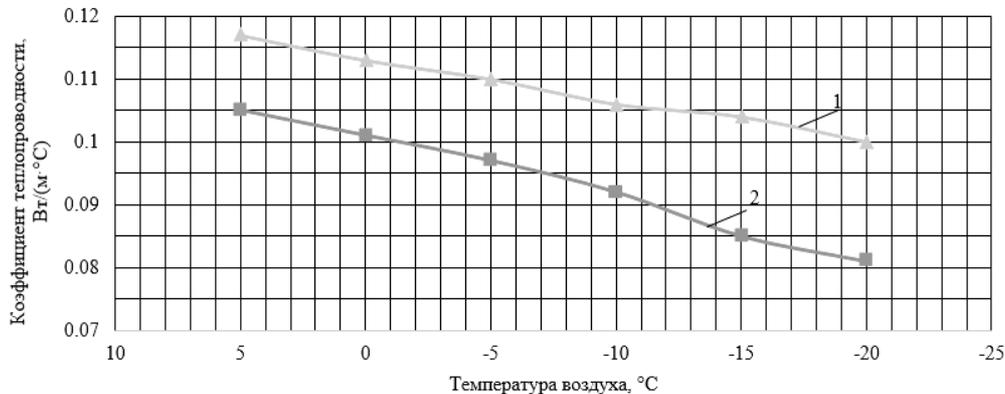
Рисунок 3. – Распределение температуры по толщине наружного стенового материала с соломенным блоком (а), с костросоломенным блоком (б)

При минимальной температуре воздуха $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура на поверхности I со стороны помещения образцов на основе соломы составила $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше в сравнении с образцами на основе соломы с кострой льна. На расстоянии 75 мм от поверхности I температура соломенных образцов составляет $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и меньше показателя костросоломенных образцов, равного $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, на 29%. Также разница температур в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ сохраняется и на расстоянии 150 мм от поверхности I. При этом для соломенных образцов температура достигает только $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для образцов на основе смеси соломы с кострой составляет $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура образцов на основе соломы на расстоянии 225 мм от поверхности I опускается до $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше в сравнении с костросоломенными образцами. Температура соломенных образцов на поверхности II со стороны улицы равна $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, на основе смеси соломы с кострой составляет $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разница температур $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Величина амплитуды температур при $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцов на основе соломы составляет $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, а блоков на основе смеси соломы с кострой равняется $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, разница амплитуд температур достигает $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ амплитуда температур блоков на основе соломы составляет $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на 10% меньше, чем показатель блоков на основе соломы с кострой льна, соответствующий $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Амплитуда температур соломенных блоков при температуре -21°C увеличилась на 19% в сравнении со значениями при -10°C . Увеличение амплитуды костросоломенных блоков составило 20%.

На основании полученных показателей плотностей тепловых потоков определены коэффициенты теплопроводности стеновых материалов на основе соломы и смеси соломы с кострой льна. На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента теплопроводности от температуры наружного воздуха.



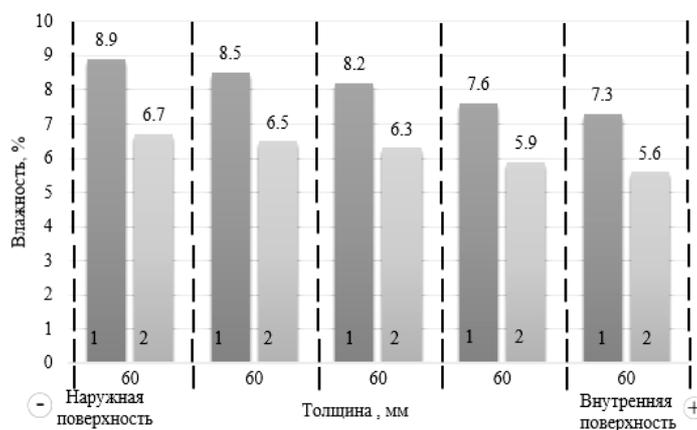
1 – соломенный блок; 2 – костросоломенный блок

Рисунок 4. – Зависимость коэффициента теплопроводности наружного стенового ограждения от температуры наружного воздуха

Так, при температуре -21°C значение коэффициента теплопроводности соломенных блоков составляет 0,1 Вт/(м·°C), что на 24% выше показателя костросоломенных блоков, равного 0,081 Вт/(м·°C). Коэффициент теплопроводности костросоломенных блоков при температуре -10°C равен 0,092 Вт/(м·°C) и меньше значения теплопроводности соломенных блоков на 13%, равного 0,106 Вт/(м·°C). Значение теплопроводности соломенных блоков при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ составляет 0,117 Вт/(м·°C), что на 11% больше показателя костросоломенных блоков, равного 0,105 Вт/(м·°C). Коэффициент теплопроводности соломенных блоков при температуре -21°C ниже показателя теплопроводности стеновых блоков при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ на 17%. Значение коэффициента теплопроводности костросоломенных блоков снизилось на 30%.

Таким образом, с понижением температуры у экспериментальных стеновых блоков происходит уменьшение значений коэффициента теплопроводности и повышение сопротивления теплопередаче. Такая закономерность проявляется у эффективных теплоизоляционных материалов, что подтверждается исследованиями утеплителей на растительном сырье в работе [11]. Установленные изменения теплофизических показателей при натурных исследованиях подтверждают, что костросоломенные и соломенные стеновые блоки способны обеспечивать эффективную работу по тепловой изоляции наружных стен эксплуатируемых зданий.

В начале весеннего периода, по окончании проведения мониторинга распределения температур, определены значения влажностей соломенных и костросоломенных блоков. По экспериментальным данным получен график распределения влажности по толщине блоков (рисунок 5).



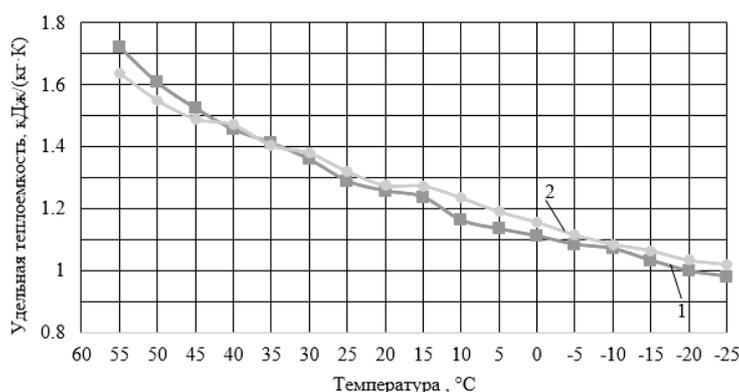
1 – блоки на основе соломы;
2 – блоки на основе смеси соломы с кострой льна

Рисунок 5. – Распределение влажности по толщине стенового материала

Среднее значение влажности блоков на основе соломы составляет 8,1%, что превышает на 31% показатель влажности блоков из смеси соломы и костры, равный 6,2%. Необходимо отметить, что влажность соломенных блоков со стороны помещения составляла 7,3%, что на 30% больше в сравнении с показателем костросоломенных блоков, равным 5,6%. Показатель влажности блоков на основе костросоломенной смеси с наружной стороны меньше на 33% в сравнении со значением соломенных блоков, равным 6,7%.

Повышение влажности блоков из соломы на 31% относительно показателей блоков на основе композиции из смеси соломы и костры льна объясняется большей величиной сорбционной влажности дробленой соломы по сравнению с кострой льна. По этой же причине соломенные блоки насыщаются влагой с большей скоростью, что подтверждается результатами исследования сорбционной влажности дробленой соломы и костры льна приведенными ранее в работе [12]. Необходимо отметить, что за летний период времени в процессе прогревания конструкций стен, костросоломенные и соломенные блоки высыхали, и средняя влажность стеновых материалов составляла не более 4...5%.

Теплоемкость стеновых материалов – один из основных теплофизических показателей. Величина теплоемкости позволяет оценить поведение стенового материала в реальных условиях эксплуатации, когда колебания температуры наружного воздуха носят циклический характер. С этой целью определена теплоемкость разработанных стеновых материалов на основе соломы и смеси соломы с кострой льна при температуре от -25 до $+60$ °С. Определены зависимости изменения удельной теплоемкости образцов от температуры воздуха (рисунок 6). Так, при температуре 20 °С удельная теплоемкость образцов на основе ржаной соломы равна 1,257 кДж/(кг·К), а образцов на основе соломы с кострой льна составляет 1,275 кДж/(кг·К). Таким образом, удельная теплоемкость костросоломенных блоков на 0,018 кДж/(кг·К) превышает показатель соломенных блоков. При уменьшении температуры до -25 °С удельная теплоемкость образцов изменяется в сторону понижения. Так, для образцов на основе соломы с кострой показатель удельной теплоемкости равен 1,018 кДж/(кг·К), что на 25% меньше в сравнении с теплоемкостью при 20 °С. Теплоемкость образцов на основе соломы снизилась на 28% и составила 0,979 кДж/(кг·К).



1 – стеновой материал на основе соломы;
2 – стеновой материал на основе смеси соломы с кострой льна

Рисунок 6. – Зависимость удельной теплоемкости стеновых материалов от температуры воздуха

Результаты исследований свидетельствуют о том, что при одинаковой температуре испытаний показатели удельной теплоемкости образцов с соломой и со смесью соломы с кострой имеют близкие значения. При сравнении с показателями существующих аналогов, таких как кирпич керамический и газосиликатный блок [13], разработанные стеновые материалы обладают более высокой удельной теплоемкостью. Так, для кирпича керамического удельная теплоемкость равна 0,88 кДж/(кг·К), а показатель теплоемкости газосиликатного блока составляет 0,84 кДж/(кг·К), что в 1,4...1,6 раза ниже показателей образцов стеновых блоков на основе соломы и смеси соломы с кострой льна.

Заключение

1. По результатам натурных испытаний при температуре -21 °С амплитуда температур костросоломенных образцов достигла 36 °С, что на 13% больше показателя соломенных образцов, равного 32 °С.

2. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при температуре -21 °С коэффициент теплопроводности блоков на заполнителе из смеси соломы и костры льна составляет 0,081 Вт/(м·°С), что на 24% ниже показателя стеновых материалов на основе соломы, равного 0,1 Вт/(м·°С).

3. По результатам проведенных исследований установлено, что средняя влажность костросоломенных блоков составляет 6,2%, что на 23% ниже показателя соломенных блоков. Низкие показатели влажности стеновых блоков способствуют обеспечению длительной эксплуатации в стеновых конструкциях с сохранением высоких теплоизоляционных свойств.

4. Проведенные исследования по определению удельной теплоемкости показали, что при понижении температуры теплоемкость стеновых блоков также уменьшается. Теплоемкость образцов на основе соломы при температуре 20 °С составляет 1,257 кДж/(кг·К), а на основе смеси соломы с кострой – 1,275 кДж/(кг·К). Высокие показатели удельной теплоемкости разработанных стеновых блоков по сравнению с традиционными материалами увеличивают теплоизолирующую способность наружных стен и обеспечивают снижение теплопотерь зданий.

5. Полученные результаты испытаний по определению тепло- и гидрофизических характеристик материалов в условиях эксплуатации подтверждают, что стеновые блоки на основе смеси соломы и костры льна выполняют не только функцию стенового ограждения, воспринимающего нагрузку, но и одновременно обеспечивают высокие теплоизолирующие свойства наружных стен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический ежегодник 2018. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2018. – 490 с.
2. Исследование теплофизических свойств вторичных продуктов сельскохозяйственного производства органического происхождения / Н.В. Савицкий [и др.] // Сборник научных трудов строительства, материаловедения, машиностроения. – 2015. – № 81. – С. 217–223.
3. Бобров, Ю.Л. Новые теплоизоляционные материалы в сельском хозяйстве / Ю.Л. Бобров. – М. : Стройиздат, 1974. – 260 с.
4. Гаврикова, Т.А. Совершенствование технологии малоэтажного монолитного домостроения из кустобетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Т.А. Гаврикова. – Н. Новгород, 2006. – С. 10–12.
5. Hygrothermal Behavior of Clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation / Y. Brouard [et al.] // Advanced Engineering Forum. – 2017. – Vol. 21. – P. 242–248.
6. Mansour, A. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt / A. Mansour, J. Srebric, B. Burley // Journal of Applied Sciences Research. – 2007. – Vol. 3, Iss. 11. – P. 1571–1580.
7. Джумаев, Д.С. Арболит на основе стеблей хлопчатника и технологические особенности его изготовления / Д.С. Джумаев // Вестник КГУСТ. – Бишкек, 2012. – № 3. – С. 10–15.
8. Должонок, А.В. Композиционный стеновой материал на основе отходов растениеводства / А.В. Должонок, Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Методология и принципы ценообразования в строительстве. Инновационные технологии в строительной отрасли и их внедрение : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 мая 2017 г. / РУП Республ. научн.-техн. центр по ценообразованию в строительстве ; ред. кол.: Г.А. Пурс [и др.]. – Минск, 2013. – С. 64–68.
9. Сырьевая смесь для изготовления арболита : пат. 21884 ВУ / А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко, А.В. Должонок, С.А. Романовский. – Оpubл. 30.04.2018.
10. Бетоны. Методы определения влажности : ГОСТ 12730.2-78. – Введ. 01.01.80. – М. : Изд-во стандартов СССР, 1980. – 3 с.
11. Bakatovich, A. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste / A. Bakatovich, N. Davydenko, F. Gaspar // Energy and Buildings. – 2018. – Vol. 180. – P. 72–82.
12. Должонок, А.В. Сорбционная влажность стеновых материалов на основе отходов сельскохозяйственного производства / А.В. Должонок, А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : материалы междунар. науч.-практ. конф., Полоцк, 18–19 окт. 2018 г. ; Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 233–237.
13. Строительная теплотехника с изм. : ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). – Взамен СНБ 2.04.01-97 ; Введ. 29.12.2006. – Минск : Минстройархитектуры, 2007. – 35 с.

Поступила 21.12.2018

THE RESEARCH OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF WALL MATERIALS IN THE CONDITIONS OF USE OF A BUILDING

A. DALZHONAK, A. BAKATOVICH

Information on the use of straw crops and flax fires in the production of wall building materials is provided. The results of studies of thermophysical properties of wall materials based on straw aggregates and flax fires during field tests are considered. Obtained diagrams of temperature and humidity distribution inside the wall materials are analyzed. The specific heat capacity of wall materials is investigated. A plot of the specific heat capacity of wall blocks versus the temperature is constructed.

Keywords: wall materials, straw, flax campfire, blocks, humidity, plant raw materials, specific heat capacity, humidity, field tests, heat flux.

УДК 621.317:084.2

**МЕТОДИКА СОПРОВОЖДЕНИЯ РАЗВИТИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ
В ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМАХ**

*канд. техн. наук, доц. Д.Н. ШАБАНОВ;
А.Н. ЯГУБКИН; В.А. ХВАТЫНЕЦ; Е.А. ТРАМБИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается проблема напряженно-деформированного состояния цементных систем. Анализируются существующие методы определения трещин, зарождающихся внутри бетонных конструкций. Представлен тензометрический комплекс для определения напряженно-деформированного состояния цементных систем, в котором усовершенствован ранее применяемый авторами глубинный датчик. Описана методика сопровождения развития структурных дефектов в применяемых образцах-кубиках из цементного теста. Параллельно с глубинным датчиком результаты фиксировались датчиками акустической эмиссии и программного комплекса SonicVisualizer. Показана цель предложенного способа – повышение точности определения зарождения и развития трещины в образце по параметрам акустической эмиссии. Согласно гипотезе, данная система с более высокой достоверностью может получать области упругих деформаций в цементных системах, избегая накопления пластических деформаций, что позволит в дальнейшем предотвратить прогрессирующее разрушение бетонных конструкций.

Ключевые слова: цементная система, трещина, глубинный датчик, акустическая эмиссия, пластическая деформация, прогрессирующее разрушение, остаточный ресурс.

Введение. Для корректного определения остаточного ресурса бетона исходные данные необходимо определять по результатам натуральных испытаний и измерений. Величины напряжений, возникающих в бетоне, как правило, принимаются по результатам стандартных расчетов, что не отражает действительной работы конструкции. Возникает необходимость искать достоверные оперативные способы получения исходных данных для расчетов непосредственно в процессе эксплуатации. Выходом из создавшегося положения служит применение телеметрических систем контроля за состоянием объектов [1].

В статьях [1; 2] рассмотрены тенденции создания систем строительного мониторинга. Выделены основные факторы, влияющие на безопасность эксплуатации объектов, определены основные задачи данных систем. Создание подобной системы позволит регистрировать изменения напряженно-деформированного состояния конструкции и оценивать степень этого изменения. Для решения данной задачи достаточно использовать аналогово-цифровые преобразователи, микроконтроллеры, датчики с низкой относительной погрешностью.

Работа С.Г. Никольского [3] посвящена проблеме создания неразрушающего метода определения следующих величин для конкретного изделия: максимальной неразрушающей нагрузки, остаточного ресурса конструкции и эрозии бетона. Цель предложенного способа – повышение точности определения износа материала по параметрам акустической эмиссии (АЭ). Сдвиговые микропластические деформации в вершине трещины предшествуют ее старту, поэтому дискретная акустическая эмиссия при разгрузке появляется еще до старта трещины. Это обстоятельство позволило создать надежный способ определения пороговой нагрузки для изделий с исходными технологическими дефектами, результат которого не зависит от предыстории изделия.

Используя неразрушающий способ, можно определить максимальную неразрушающую нагрузку, которую изделие способно воспринять при различных схемах его нагружения, и с учетом полученных результатов оптимально ориентировать изделие для дальнейшей эксплуатации. Такой прием позволяет повысить несущую способность изделия в несколько раз, а долговечность при заданном режиме нагружения – на несколько порядков. Описанный в указанной работе прием определения максимальной неразрушающей нагрузки изделия позволяет контролировать кинетику разрушения, независимо от внешних факторов. Авторами исследованы общие принципы построения систем строительного мониторинга, предложена их типовая структурная схема и проведена классификация используемых технических средств. Разработаны рабочие предпосылки создания измерительного комплекса, методика лабораторных исследований зарождения и сопровождения дефекта и программное обеспечение для обработки полученных экспериментальных данных. При этом предусматривается обработка сразу нескольких этапов трещинообразования, исходя из их энергетических уровней, что позволяет определить переходный этап по параметрам звуковой волны, которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия.

Для более детального изучения развития деформаций в бетонных образцах в работах [4–8] принято решение использовать глубинные датчики. Как показали исследования [9], применение такого типа глубинного датчика дает хорошую сходимость экспериментальных и теоретических данных.

Искажение измеряемых напряжений может быть весьма существенным и зависит от степени несоответствия деформативных свойств среды и датчика напряжений, а также ряда других факторов. Поэтому успех применения датчиков напряжений в первую очередь зависит от решения вопросов уменьшения искажения напряжений в зоне их включения в среду [10].

Как показали первые испытания глубинных датчиков, выполненных по технологии, представленной в [13; 14], существует ряд проблем, связанных с внедрением датчика в структуру бетона. Форма датчика имеет достаточно углов, которые могут быть концентраторами напряжений в структуре исследуемого бетона и тем самым способствовать снижению прочности экспериментального образца.

В работе Л.Н. Фомицы [10] для датчиков вводятся дополнительные требования, обеспечивающие повышение точности измерений:

- 1) модуль деформации датчика в направлении измеряемых напряжений должен быть выше модуля деформации среды;
- 2) геометрическая форма датчика должна быть такой, чтобы искажение измеряемой компоненты было минимальным;
- 3) датчик должен обладать избирательными свойствами – быть чувствительным только к измеряемой компоненте напряжений и инертным по отношению к другим;
- 4) показания датчика не должны зависеть от характера распределения напряжений по его рабочей поверхности – он должен обладать интегрирующими свойствами;
- 5) условия контакта со средой должны обеспечивать надежную передачу измеряемых напряжений.

При создании системы мониторинга зачастую невозможно установить датчики во все интересующие элементы конструкции, так как для этого необходимо использовать слишком большое количество датчиков и коммуникационных комплектующих, что неизбежно приводит к значительному росту стоимости системы. В этом случае представляется рациональным устанавливать датчики в наиболее нагруженных (по результатам компьютерного моделирования) конструктивных элементах здания [11].

Использование рассмотренного выше метода, а также методов акустической эмиссии позволит сопровождать развитие дефекта в магистральную трещину, исключая возможность разрушения материала из-за образования этой трещины.

Основная часть. Сопровождение развития дефекта осуществлялось с помощью тензометрического комплекса, включающего в себя: глубинный датчик [13; 14], микроконтроллер с аналогово-цифровым преобразователем STM32 и программное обеспечение PhyZ Module [12]. Тензометрический комплекс позволяет представить процесс развития дефекта в виде графика, таблицы в реальном времени с выводом на монитор компьютера или записью на электронный носитель.

Для определения напряженно-деформированного состояния цементного теста в качестве опытных образцов использовались три цементных кубика с размерами $70 \times 70 \times 70$ мм. Водоцементное отношение 0,4. Перед началом испытаний кубики взвешивались для определения их средней плотности. В данном эксперименте, в отличие от работ [13; 14], применялся датчик цилиндрической формы. По принятому решению использовался глубинный датчик цилиндрической формы (рисунок 1), так как согласно выдвинутой гипотезе это позволит избежать концентраций дополнительных напряжений в образце.

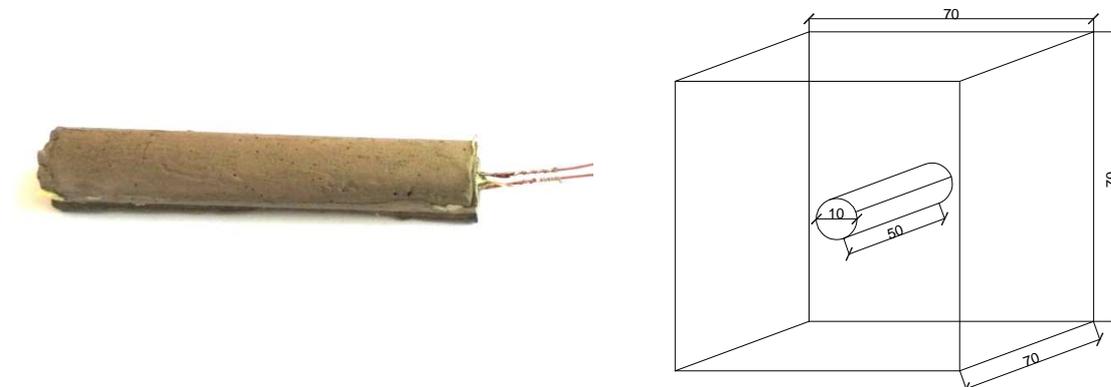
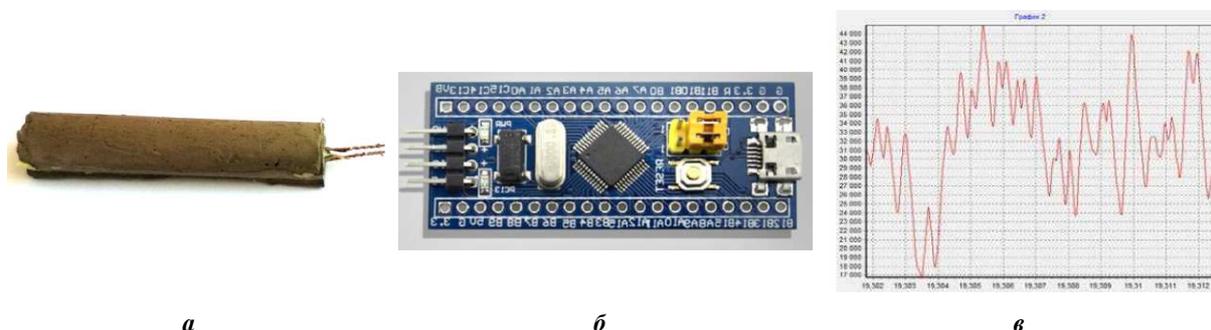


Рисунок. 1 – Глубинный датчик цилиндрической формы и его расположение в образце

В образцах № 1 и № 2 цилиндрические датчики размещались взаимно перпендикулярно друг другу (по направлениям развития главных деформаций) с зазором так, чтобы они не соприкасались. Образец № 3 был заформован без глубинных датчиков внутри.

Результаты испытаний цементных кубов фиксировались с помощью гидравлического пресса ПГМ-500МГ4А, а также с помощью тензометрического комплекса.

Тензометрический комплекс принимает аналоговые сигналы с последующей их оцифровкой и передачей через канал связи на компьютер. Принцип работы данной установки показан на рисунке 2.



a – глубинный датчик; *б* – микроконтроллер STM32; *в* – программа PhyZModule [12]

Рисунок 2. – Необходимые компоненты для работы собранной установки

Преимущество данного комплекса заключается в том, что он автоматически снимает отсчеты, регистрирует их в журнал испытаний и обрабатывает результаты наблюдений, что существенно сокращает продолжительность снятия отсчетов и уменьшает трудоемкость данного процесса. Благодаря многоканальности данной системы стало возможным одновременное снятие показаний с нескольких датчиков, что крайне важно для получения полной картины напряженно-деформированного состояния исследуемого образца. Фиксация данных проводилась на протяжении полного цикла нагружения с синхронизацией во времени. Результаты испытаний для трех образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики испытываемых цементных образцов

№ образца	В/Ц	Цемент, кг/м ³	Вода, кг/м ³	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Разность электрического напряжения между состоянием покоя и разрушением образца, В
1	0,4	300	120	1,965	28,94	0,387
2	0,4	300	120	1,985	30,33	0,402
3	0,4	300	120	1,99	33,9	–

На основании анализа данных, представленных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

- при внедрении в структуру цементной системы глубинного датчика незначительно снижается прочность самого образца, при этом плотность остается почти такая же, как и в образце без установленного датчика. Следует отметить необходимость дальнейших испытаний для определения влияния глубинного датчика на структуру бетона;

- созданная система фиксирует изменение напряжения только в датчиках, установленных в образцах горизонтально, при этом наблюдаются сильные шумы. Кроме того представленная система реагирует на выходной сигнал глубинного датчика, однако при должной настройке планируется улучшить наглядность получаемых результатов. Параллельно с глубинным датчиком снимали показания результатов с датчиков акустической эмиссии и программного комплекса SonicVisualizer.

Таким образом, цель предложенного способа заключается в повышении точности определения зарождения и развития трещины в образце по параметрам акустической эмиссии, а применение представленных методов (глубинным датчиком и датчиком акустической эмиссии) обеспечит более высокую достоверность получения области упругих деформаций и позволит избежать накопления пластических, исключив тем самым прогрессирующее разрушение.

В дальнейшем предполагается увязать полученные результаты с возможностями компьютерного моделирования для последующей визуализации и анализа происходящих структурных изменений в цементных системах.

Совершенствуя датчики и установку для контроля за напряженно-деформированным состоянием цементных систем, можно добиться предупреждения и предотвращения возможных обрушений бетонных и железобетонных конструкций. Результаты, полученные с помощью датчиков акустической эмиссии, отображены на рисунке 3.

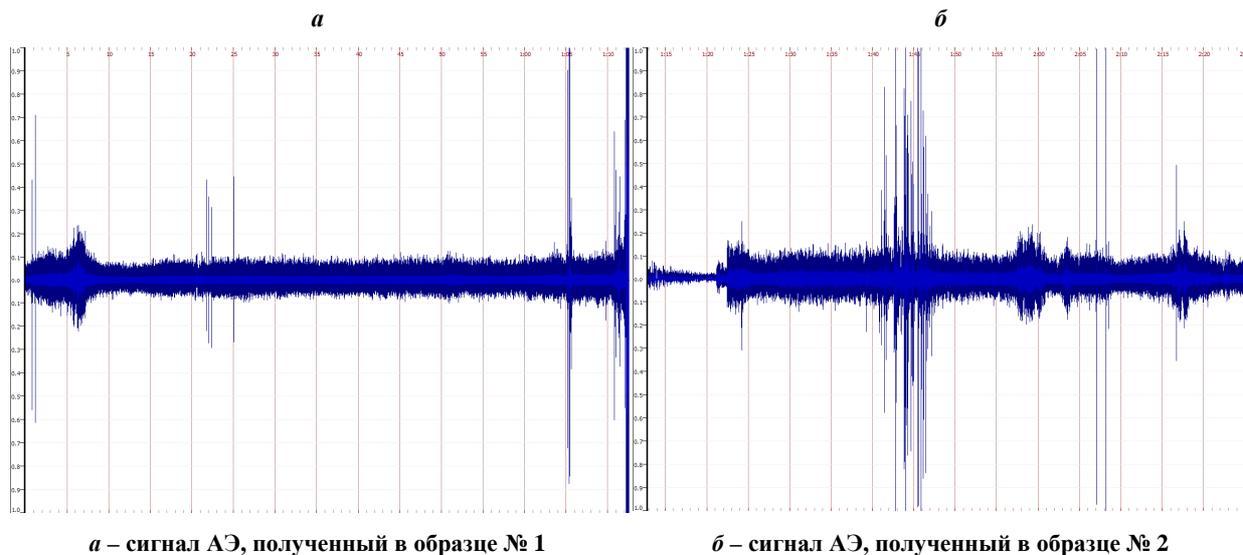


Рисунок 3. – Общий вид сигналов акустической эмиссии

Характер разрушения образцов с глубинными датчиками внутри показан на рисунке 4.



Рисунок 4. – Характер разрушения цементного куба с установленным в него глубинным датчиком

Заключение. Проведенные исследования позволяют представить механизм развития структурных дефектов в цементных системах следующим образом: с помощью двух типов датчиков (глубинного и акустической эмиссии) ведется контроль за формированием и дальнейшим развитием микродефектов (трещин) в структуре цементных образцов. При этом созданная система предусматривает обработку сразу нескольких входящих сигналов, что подразумевает ее многоканальность. В перспективе данный комплекс будет использоваться для определения переходного этапа трещинообразования бетонных и железобетонных конструкций, исходя из их энергетических уровней по параметрам звуковой волны (которая, в свою очередь, характеризует встречающиеся препятствия) и глубинного датчика, характеризующего механические изменения, непосредственно внутри конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шешуков, А.Н. Применение телеметрических систем для мониторинга напряженно деформированного состояния конструкций / А.Н. Шешуков, С.В. Мальцев, Р.П. Богуш // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений : сб. науч. тр. ; под ред. Д.Н. Лазовского. – Минск, 2001. – С. 402–404.
2. Соломахо, В.Л. Методы и средства строительного мониторинга / В.Л. Соломахо, И.Ф. Мирошниченко, П.А. Петрусенко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та : науч.-техн. журн. – 2007. – № 5. – С. 21–24.
3. Никольский, С.Г. Экспресс-метод контроля эрозии бетона / С.Г. Никольский // Инженерно-строительный журнал. – 2008. – № 2. – С. 39–44.

4. Исследование деформативности бетонных колонн методом глубинной тензометрии / Г.Л. Ватуля [и др.] // Збірник наук. праць ; Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – № 3 (2). – С. 30–36.
5. Ватуля, Г.Л. Определение деформаций бетона с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 2. – С. 48–56.
6. Ватуля, Г.Л. Определение механических характеристик конструкций с помощью глубинных датчиков / Г.Л. Ватуля, Е.И. Галагурия, Д.Г. Петренко // Будівельна механіка і гідраліка : зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2016. – Вып. 138. – С. 231–235.
7. Безгодков, И.М. К вопросу о методике исследования бетона в условиях трехосного сжатия [Электронный ресурс] / И.М. Безгодков, И.А. Горбунов, П.Ю. Шульгин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – Режим доступа: <http://pamag.ru/src/pressa/076.pdf>.
8. Макаренко, С.Ю. Применение глубинных датчиков на основе тензорезисторов при исследовании деформаций ползучести тяжелого бетона / С.Ю. Макаренко // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы : материалы науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения проф. Н.Н. Леонтьева и 110-летию проф. В.З. Власова ; МГСУ. – 2017. – С. 74–77.
9. Красновский, Р.О. О методике испытания железобетонных балок на действие поперечных сил / Р.О. Красновский // Методика лабораторных исследований деформаций и прочности бетона, арматуры и железобетонных конструкций. – М. : Госстройиздат, 1962. – С. 160–173.
10. Фомица, Л.Н. Полупроводниковые преобразователи для измерения механических напряжений / Л.Н. Фомица. – Минск : Выш. школа, 1983. – 123 с.
11. Таракановский, В.К. Обзор современных средств мониторинга состояния конструкций и грунтов оснований высотных зданий / В.К. Таракановский // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. – М., 2010. – Вып. 9. – С. 243–262.
12. Змитрович, С.Ю. Обработка аналоговых сигналов датчиковой аппаратуры. Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018) [Электронный ресурс] / С.Ю. Змитрович, С.А. Вабищевич : электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 14–15 июня 2018 г. – С. 272–275.
13. Шабанов, Д.Н. Determination of the stress-strain state of concrete using the tensometry method / Е.А. Трамбицкий, Д.Н. Шабанов // European & national dimension in research : materials X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, 10–12 May 2018. – С. 77–78.
14. Шабанов, Д.Н. Контроль напряженно-деформированного состояния бетонных конструкций с использованием метода тензометрии [Электронный ресурс] / Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Е.А. Трамбицкий // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. – С. 242–247.

Поступила 12.12.2018

TECHNIQUE OF SUPPORTING THE DEVELOPMENT OF STRUCTURAL DEFECTS IN CEMENT SYSTEMS

D. SHABANOV, A. YAGUBKIN, V. HVATYNETS, E. TRAMBITSKY

The stress-strain state of cement systems is considered. The analysis of existing methods for the determination of cracks arising within concrete structures is presented. The strain gauge complex used to determine the stress-strain state of cement systems is presented, in which the depth sensor used by the authors has been improved. The technique of supporting the development of structural defects in the used cubic samples of cement paste is described. In parallel with the downhole sensor, the results were recorded by acoustic emission sensors and the SonicVisualizer software package. The purpose of the proposed method is to improve the accuracy of determining the nucleation and development of cracks in the sample according to the parameters of acoustic emission. According to the hypothesis, this system with higher reliability can receive areas of elastic deformations in cement systems, avoiding the accumulation of plastic deformations, which will further prevent the progressive destruction of concrete structures.

Keywords: *cement system, crack, deep sensor, acoustic emission, plastic deformation, progressive failure, residual life.*

УДК 666.97.035:691.32:519.6

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

А.М. НИЯКОВСКИЙ

(Полоцкий государственный университет)

Представлен анализ научных публикаций, посвящённых вопросам математического моделирования и расчёта кинетики гидратации, формирования температурных полей при твердении бетонов в зависимости от условий термообработки. Предложена основанная на трёхмерном уравнении нестационарной теплопроводности математическая модель, позволяющая рассчитать процесс твердения бетонных изделий сложной геометрической формы. На симметричном тестовом изделии проведена оценка её адекватности.

Ключевые слова: математическое моделирование, кинетика гидратации цемента, температурные поля, трёхмерное уравнение теплопроводности, нестационарная теплопроводность, промышленная теплоэнергетика.

Введение. Для построения рациональной теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСПП), выпускающего бетонные изделия, вопрос о целесообразной технологической потребности в энергии, её виде, объёме и потенциале является основополагающим [1]. В качестве главных элементов ТЭСПП такого производства выступают следующие: узел приготовления бетонной смеси, узлы формовки готовых изделий, установки ускоренной гидратации цемента. В каждом из указанных элементов происходят энергетические превращения, в конечном итоге предопределяющие прочность и внутреннюю структуру изготавливаемых бетонных изделий. Причём можно предполагать функциональную зависимость между осуществлёнными в процессе производства затратами энергии, выходной прочностью изделия и временем его изготовления.

Объём и мощность потребления энергии при производстве бетонных изделий зависят от особенностей протекания экзотермических реакций и распределения температур в бетонном теле при его тепловой обработке с учётом назначенной её продолжительности. Значительная часть исследований, посвящённых данной проблеме, основывается на математическом аппарате, оперирующем эмпирическими или полуэмпирическими уравнениями, содержащими, как правило, трудноопределимые на практике коэффициенты, привязанные к конкретным экспериментальным данным [2–4].

Другая группа исследований связана с использованием уравнения теплопроводности для расчёта процесса твердения бетона, однако большая часть таких работ ограничивается расчётами одномерных или двумерных моделей [5–13]. Оба подхода имеют общий недостаток и не позволяют учесть сложную геометрию форм бетонных изделий, получаемых в реальном производстве, что делает по-прежнему актуальным отыскание решений данной задачи в трёхмерной постановке при переменных во времени теплофизических свойствах материалов. Наибольший прогресс следует ожидать в результате применения численных методов анализа и компьютерного моделирования.

Несмотря на значительные достижения в области трёхмерного моделирования, вопросы расчёта температурных полей и кинетики твердения бетона в изделиях сложных пространственных форм все ещё требуют глубоких исследований, в том числе и с использованием фундаментального уравнения нестационарной теплопроводности, которое в применении к твердеющему бетону имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (1)$$

где λ , ρ , c – соответственно теплопроводность, плотность, удельная массовая теплоёмкость бетона; q_v – мощность источников тепловыделения в объёме бетонного тела; T – температура как функция пространственных координат (x , y , z) в пределах расчётной области бетонного тела.

Цель настоящей работы на данном этапе исследования состоит в разработке математической модели на основе нестационарного уравнения теплопроводности для расчёта полей температуры и степени гидратации в бетонном изделии кубической формы, подвергаемом тепловой обработке.

Обзор сложившихся представлений о кинетике гидратации. В основу теоретических представлений о кинетике набора прочности и гидратации цемента положено высказанное McIntosh, Nurse и Saul [14; 15] и обоснованное ими предположение, что прочность тяжёлого бетона определяется степенью его гидратации, причём скорость набора прочности бетоном есть функция времени и температуры. На основании этих представлений был разработан метод оценки тепловыделений (Maturity method), оперирующий понятиями «возраст зрелости бетона», «индекс зрелости», «приведённое» или «эквивалентное

время» твердения. Суть метода состоит в приведении фактической продолжительности ускоренной тепловой обработки бетона при заданной температуре к соответствующей продолжительности его естественной выдержки (при температуре окружающей среды, например, 20 °С), обеспечивающей аналогичную прочность. В различных интерпретациях такой подход в дальнейшем использовался другими исследователями для вычисления теплоты гидратации цемента при различных температурах изотермической выдержки (Е. Раstrup, И.Д. Запорожец, А.А. Гвоздев, С.В. Александровский, А.В. Ущеров-Маршак, Н.Б. Марьямов и др.) [2; 3; 5; 6; 16; 17].

В развитие этого метода Р. Freiesleben Hansen, J. Pedersen., Т.Л. Brown и Н.Е LeMay предложили и обосновали новую функцию для вычисления индекса зрелости бетона, основанную на использовании уравнения Аррениуса для описания влияния температуры на скорость протекания химической реакции гидратации [15; 18; 19].

На основании указанных подходов для расчёта теплоты гидратации в зависимости от температуры и продолжительности тепловой обработки бетона были получены и нашли применение различные аналитические и полуэмпирические зависимости. В частности, С.В. Александровский [5] предложил определять экзотермию цементного клинкера для адиабатического процесса следующим образом:

$$Q(\tau) = Q_{\max} \left[\frac{t_0 (1 - e^{-B \cdot t_{\max} \cdot \tau})}{t_0 + (q_{\max} - t_0) \cdot e^{-B \cdot t_{\max} \cdot \tau}} \right], \quad (2)$$

где Q_{\max} – предельно возможное тепловыделение при гидратации, свойственное данному цементу, Дж/кг; t_0 – начальная температура процесса, °С; t_{\max} – максимальная температура в конце тепловыделения в адиабатическом процессе, °С; B – параметр скорости адиабатического тепловыделения средний для процесса, зависящий от количества участвующего в реакции гидратации цемента и температуропроводности бетонного тела; τ – продолжительность тепловыделения, ч.

В свою очередь, И.Д. Запорожец [16], А.В. Ущеров-Маршак [2;17] и А.А. Гвоздев [6; 20] предложили следующие зависимости для определения тепловыделений при твердении бетона:

$$Q(\tau) = Q_{\max} \left[(1 + A_{20} \cdot \tau)^{\frac{1}{m+1}} \right]; \quad (3)$$

$$Q(\tau) = Q_{\max} \left[1 - \exp(-K_q \cdot \tau^{n_q}) \right]; \quad (4)$$

$$Q(\tau) = Q_{\max} [1 - \exp(\gamma \cdot \tau)]. \quad (5)$$

Здесь γ – коэффициент, определяемый физико-химическими свойствами цемента; A_{20} – коэффициент, зависящий от скорости нарастания тепловыделений при заданной температуре твердения 20 °С; m – коэффициент, зависящий от вида и типа цемента; K_q , n_q – безразмерные коэффициенты, полученные опытным путём; остальные входящие величины, те же, что и в формуле (2).

Другой учёный, Н.Б. Марьямов, представил тепловыделения при гидратации цемента в бетонных изделиях как функцию произведения средней температуры на продолжительность тепловой обработки [3]:

$$Q(\tau) = 1,85 Q_{\max} (В/Ц)^{0,44} (1 - a \cdot e^{\bar{t} \cdot \tau}); \quad (6)$$

или при $0 < \bar{t} \cdot \tau < 300$

$$Q(\tau) = 0,0023 Q_{\max} (В/Ц)^{0,44} \bar{t} \cdot \tau, \quad (6')$$

где В/Ц – водоцементное отношение, принятое при затворении бетона; \bar{t} – температура тепловой выдержки, °С; остальные величины те же, что и в предыдущих формулах.

Для решения рассматриваемой задачи G. De Schutter и L. Taerwe [21] предложили следующую совокупность уравнений:

$$\begin{aligned} Q(\tau, r_{II}) &= Q_{\max} \cdot f(r_{II}) \cdot q(t_{\tau}); \\ q(t_{\tau}) &= \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{t + 273} - \frac{1}{293} \right) \right]; \\ f(r_{II}) &= c [\sin(\pi \cdot r_{II})]^a \cdot \exp(-b r_{II}). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь r_{II} – степень гидратации цемента; $q(t_{\tau})$ – функция, приводящая фактическую продолжительность тепловыделений при фактической температуре твердения к продолжительности естественного твердения

при температуре окружающей среды, обеспечивающей такую же прочность; a, b, c – параметры гидратации (для портландцементов: $a = 0,667$; $b = 3,0$; $c = 2,5968$); t – температура бетона, °C; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·K).

Очевидно, что функция $q(t_\tau)$ из совокупности уравнений (7) является масштабом времени и имеет то же содержание, что и произведение $(\bar{t} \cdot \tau)$ в уравнении (6).

В уравнениях (3)–(6), (6') время τ не совпадает с физическим временем, а является функцией температуры бетона: чем выше эта температура, тем большую прочность наберёт бетон за меньшее фактическое время и тем большей будет величина τ . Иными словами, если температура выдержки бетона отличается от температуры естественных условий твердения, например, 20 °C, то в уравнениях (3)–(6), (6') должно фигурировать не физическое, а некоторое условное, «приведённое» время, соответствующее возрасту бетона аналогичной прочности, набранной им без тепловой обработки. В общем виде приведённое время может быть выражено следующим образом [6; 20]:

$$\tau_{\text{прив}} = \int_{\tau_0}^{\tau} F_Q [t(\tau)] d\tau, \quad (8)$$

где $F_Q [t(\tau)]$ – функция температуры; τ_0 – время, соответствующее началу воздействия температуры, отличной от 20 °C; τ – текущее (физическое) время; для определения функции $F_Q [t(\tau)]$ в [6 и 20] даны соответствующие эмпирические зависимости.

Сравнение результатов, получаемых с помощью уравнений (2)–(7), выполненное в работах [15; 21; 22] путём экспериментальной проверки и детальных расчётов, показывает, что комплекс уравнений (7) даёт более точные результаты в широком диапазоне времени и температур. Вместе с тем путём разбиения переменной времени на отдельные диапазоны и подбором соответствующих им коэффициентов в уравнениях (3)–(6) можно также добиться удовлетворительной сходимости с экспериментальными данными. При этом следует отметить, что во всех этих уравнениях используются величины, которые могут быть получены только экспериментальным путём. Поэтому возможность их применения и точность полученных с их помощью результатов целиком зависят от доступности и качества необходимых экспериментальных данных.

Сведения о кинетике гидратации особенно важны при математическом моделировании и расчёте температурных полей в твердеющем бетоне в режиме реального времени, поскольку температура в данной точке бетонного тела должна определяться с учётом имеющихся в её окрестности тепловыделений, в свою очередь, являющихся функцией этой температуры.

Математическая модель. Развиваемая в настоящей работе математическая модель основывается на уравнении теплопроводности и позволяет рассчитать эволюцию распределения температуры $T(x, y, z, \tau)$ и коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ в условиях заданного закона тепловой обработки изделия из бетонной смеси. Расчёт изменения температуры в различных точках трёхмерного пространства твердеющего бетона (рисунок 1, а, область Ω_1) производился по уравнению:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_\beta \rho_\beta} \left[W_c P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \right. \\ \left. + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial z} \right]. \quad (9)$$

Здесь τ – время; (x, y, z) – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); $T(x, y, z, \tau)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ , °C; ρ_β – плотность бетона, кг/м³; W_c – удельный расход цемента в бетоне (кг/м³); c_β – удельная теплоёмкость бетона, Дж/(кг·°C); $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) к моменту времени τ , Дж/кг; $H(x, y, z, \tau)$ – степень гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) , достигнутая к моменту времени τ , вычисляемая как отношение количества выделившейся теплоты гидратации в указанной точке на данный момент времени к предельно возможному тепловыделению, свой-

ственному данному цементу: $H(x, y, z, \tau = Q(x, y, z, \tau) / Q_{\max})$; $\lambda(H, T)$ – теплопроводность бетона, зависящая от его состава, степени гидратации и температуры, Вт/м²; $P_q(Q, T)$ – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг.

Поступление теплоты гидратации в зависимости от температуры и времени определялось по данным [9]. При выполнении численных расчётов удельная мощность тепловыделений рассматривалась как отношение величины приращения тепловыделений к промежутку времени, в течение которого данное приращение произошло:

$$P_q(Q, T) = \frac{dQ(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))}{d\tau} \approx \frac{Q(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T) + \Delta\tau) - Q(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))}{\Delta\tau}, \quad (10)$$

где Q – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента к рассматриваемому моменту времени; $(T, \tau_{\text{прив}}(Q, T))$ – функция тепловыделения цемента; $\tau_{\text{прив}}(Q, T)$ – приведённое время гидратации цемента; $\Delta\tau$ – шаг изменения времени тепловой обработки, с.

Параллельно с распределением температур в пространстве бетонного изделия производился расчёт распределения тепловыделений и, соответственно, степени гидратации цемента в бетоне согласно следующему уравнению:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(Q(x, y, z, \tau))). \quad (11)$$

Расчёт изменения температуры в различных точках трехмерного пространства стальной опалубки и конструктивных элементов оборудования (рисунок 1, а, область Ω_2) производился согласно уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{c_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}}} \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right], \quad (12)$$

где $c_{\text{ст}}$ – удельная теплоёмкость стали (475 Дж/кг); $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стали (7850 кг/м³); $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность стали (44,5 Вт/(м·К)); остальные обозначения те же, что и в приведённых выше формулах.

Граничные условия для температуры $T_0(\tau_0)$ на границе области Ω_2 и Ω_3 системы «бетон – опалубка – среда тепловой обработки» приведены в таблице 1 и задавались интервальной функцией в виде трёх участков, характеризующих нагрев, изотермическую выдержку и охлаждение.

Предлагаемая модель разработана для бетонных изделий произвольных геометрических форм. Однако на первом этапе исследования с целью сравнения получаемых на её основе результатов с доступными опубликованными ранее экспериментальными данными в качестве объекта исследования выбран куб с размерами 0,3×0,3×0,3 м (рисунок 1, б). На границах куба симметрично по его граням были заданы граничные условия третьего рода с учётом функции $T_0(\tau)$. Теплофизические свойства бетонной смеси определялись на основе закона аддитивности.

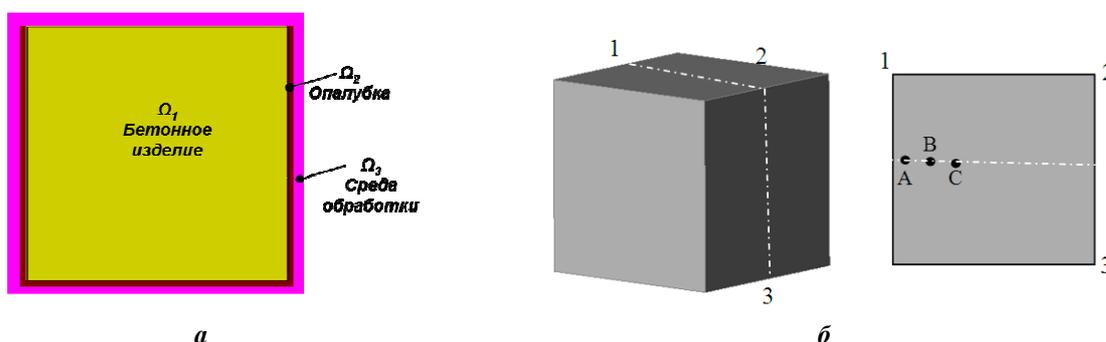


Рисунок 1. – Схематичное изображение объекта «куб» размером 0,3×0,3×0,3 м и выделенной плоскости Y с точками А, В, С

Для расчёта температурного поля по уравнению (10) использовалась явная конечно-разностная схема, реализованная с помощью математического ядра и специального программного модуля для вычисления температур [23]. Число расчётных сеточных элементов трёхмерной модели составило 238328 при среднем размере расчётного сеточного элемента 0,005 м.

Результаты расчёта. На рисунке 2 представлены фрагменты визуализации распределения температур и коэффициентов гидратации на момент времени $\tau = 46800$ с для центральной плоскости ($Y = 0,15$) куба, подвергнутого тепловой обработке. Расчёты показали неоднородный характер как температурного поля, так и поля гидратации, что видно из рисунка 2.

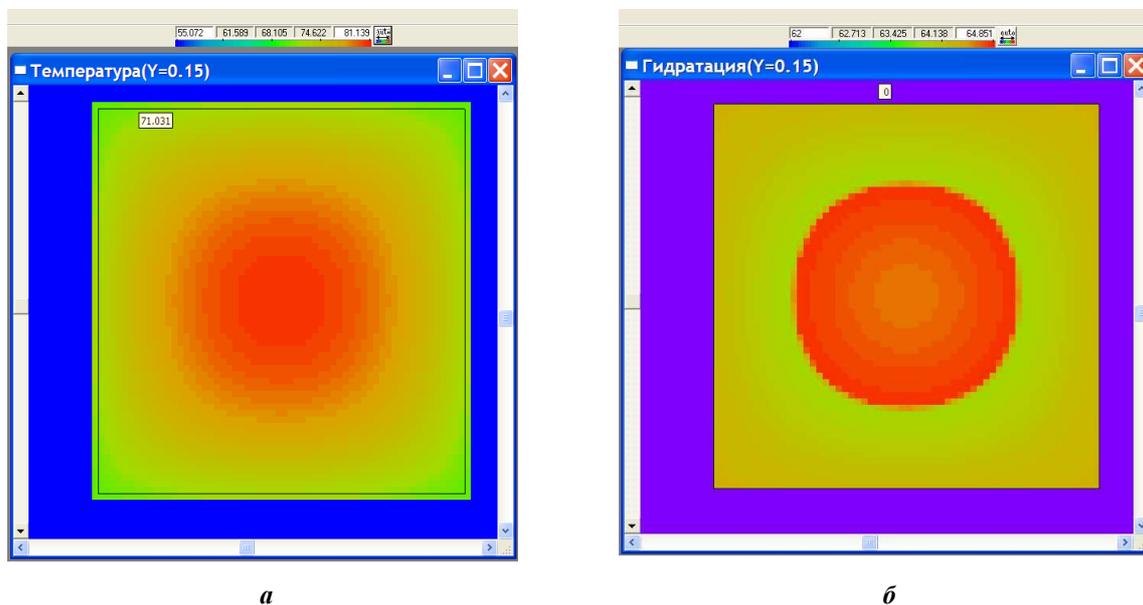


Рисунок 2. – Изображение расчётного распределения температур (а) и коэффициента гидратации (б) среднего сечения «куба» с размерами $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м на момент времени 46800 с

В таблице 1 представлены результаты моделирования температур и коэффициентов гидратации в выделенных точках А (0,15; 0,15; 0,0025), В (0,15; 0,15; 0,075), С (0,15; 0,15; 0,15) среднего сечения куба, подвергнутого тепловой обработке. Следует отметить, что таких сечений в кубе три в силу симметрии задачи.

Таблица 1 – Расчётные значения коэффициента гидратации (H) и температуры (T) в выделенных точках: А (0,15; 0,15; 0,0025), В (0,15; 0,15; 0,075), С (0,15; 0,15; 0,15) среднего сечения куба размером $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м

Время, τ , с	T_0 , °C (граница)	H , % (точка А)	H , % (точка В)	H , % (точка С)	T , °C (точка А)	T , °C (точка В),	T , °C (точка С)
1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	0,0005	0,0005	0,0005	20	20	20
1200	25,42	1,22	1,22	1,22	21,24	20,81	20,79
2400	30,84	2,53	2,48	2,48	23,24	21,98	21,78
3600	36,26	3,97	3,82	3,80	25,84	23,71	23,28
4800	41,68	5,55	5,27	5,22	28,94	26,04	25,39
6000	47,1	7,31	6,86	6,77	32,48	28,92	28,06
7200	52,52	9,27	8,62	8,48	36,39	32,29	31,26
8400	57,94	11,45	10,56	10,36	40,65	36,09	34,92
9600	63,36	13,85	12,72	12,46	45,18	40,26	38,98
10800	68,78	16,48	15,10	14,77	49,97	44,76	43,39
12000	74,2	19,36	17,72	17,31	54,96	49,55	48,10
13200	79,62	22,48	20,58	20,10	60,14	54,57	53,08
14400	85	25,85	23,68	23,13	65,49	59,80	58,27
15600	85	29,43	27,03	26,41	70,26	65,14	63,63
16800	85	33,24	30,08	29,66	74,26	69,96	68,62
18000	85	35,47	33,69	32,98	77,13	74,38	73,58
19200	85	37,56	35,83	35,34	79,35	77,20	76,52
20400	85	39,59	37,91	37,44	81,19	79,65	79,12
21600	85	41,59	39,94	39,47	82,72	81,75	81,37

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
22800	85	43,55	41,92	41,46	84,01	83,53	83,29
24000	85	45,49	43,86	43,41	85,09	85,03	84,92
25200	85	47,40	45,77	45,32	85,99	86,30	86,30
26400	85	49,29	47,65	47,19	86,75	87,37	87,46
27600	85	51,16	49,50	49,05	87,38	88,28	88,45
28800	85	53,03	51,34	50,88	87,92	89,05	89,29
30000	85	54,87	53,16	52,69	88,37	89,70	90,00
31200	85	56,06	54,96	54,49	88,53	90,23	90,60
32400	85	56,78	56,75	56,27	88,42	90,30	90,94
33600	85	57,50	57,81	57,61	88,31	89,96	90,54
34800	85	58,20	58,53	58,33	88,19	89,65	90,09
36000	85	58,90	59,25	59,05	88,07	89,44	89,83
37200	81,26	59,59	59,96	59,76	87,46	89,24	89,63
38400	77,53	60,29	60,68	60,48	86,31	88,87	89,38
39600	73,79	60,99	61,39	61,20	84,75	88,16	88,87
40800	70,06	61,67	62,09	61,91	82,86	87,07	88,00
42000	66,32	62,34	62,78	62,61	80,70	85,61	86,76
43200	62,58	63,00	63,47	63,29	78,30	83,84	85,17
44400	58,83	63,64	64,15	63,97	75,69	81,79	83,28
45600	55,07	64,27	64,80	64,65	72,92	79,47	81,12
46800	51,32	64,84	65,30	65,24	69,97	76,91	78,65
48000	47,57	65,31	65,80	65,74	66,86	74,14	76,00
49200	43,81	65,77	66,26	66,22	63,65	71,21	73,16
50400	40,06	66,20	66,73	66,69	60,36	68,15	70,17
51600	36,3	66,63	67,19	67,15	57,00	64,99	67,07
52800	32,55	67,03	67,63	67,61	53,57	61,73	63,87
54000	28,8	67,43	68,06	68,04	50,09	58,39	60,58
55200	25,04	67,74	68,48	68,47	46,54	54,98	57,21
56400	21,29	67,99	68,88	68,88	42,94	51,49	53,77
57600	20	68,24	69,20	69,28	39,56	47,91	50,22
58800	20	68,49	69,45	69,55	36,80	44,41	46,61

Анализ полученных расчётным путём значений показал, что изменение температуры во времени в точке А (0,15; 0,15; 0,0025) имеет два участка. На первом участке температура увеличивается от начального значения 20 °С до значения 88,53 °С при времени тепловой обработки $\tau = 31200$ с, а далее начинает уменьшаться до температуры 36,80°С. Причём в интервале времени тепловой обработки 22880...38400 с температура в точке А (0,15; 0,15; 0,0025) изменяется в пределах одного градуса и имеет тенденцию к образованию изотермической площадки. Установленная закономерность удовлетворительно согласуется с характером изменения температуры $T_0(\tau)$ на границе системы «бетон – опалубка». Причём температура в сеточном элементе А (0,15; 0,15; 0,0025) смещена вправо по отношению к температурной кривой $T_0(\tau)$ на границе системы «бетон в опалубке – тепловая среда». Этот сдвиг объясняется разными законами изменения температуры в сеточных элементах по пространству куба вследствие нестационарности процесса нагрева и охлаждения. Подобный характер изменения температуры от времени в точках В (0,15; 0,15; 0,075) и С (0,15; 0,15; 0,15) куба сопровождается максимизацией температуры, а именно достижением температур 90,30 °С и 90,94 °С при времени тепловой обработки $\tau = 32400$ с, что видно из данных таблицы 1.

Коэффициент гидратации (H), рассчитанный по температурному полю, увеличивается по мере течения времени моделирования, о чем свидетельствуют данные таблицы 1 для всех выделенных точек: А (0,15; 0,15; 0,0025); В (0,15; 0,15; 0,075); С (0,15; 0,15; 0,15).

На втором этапе проведена математическая обработка экспериментальных данных, приведённых в работе [4], полученных для двух выделенных точек куба размером 0,3×0,3×0,3 м, которые в таблице 2 условно обозначены E и F и находятся на разных расстояниях от поверхности куба в его центральном сечении.

Как видно из таблицы 2, максимизация температуры для точки E наблюдается при температуре 82 °С в интервале времени тепловой обработки $\tau = 21600$...23400 с. Следует отметить, что кривая нагрева температуры выделенного элемента сдвинута относительно кривой температуры на границе раздела системы «бетон в опалубке – среда тепловой обработки». Аналогичная закономерность наблюдается

для точки F , находящейся на вдвое большем расстоянии от поверхности куба, с той лишь разницей, что максимизация температуры на уровне $82\text{ }^{\circ}\text{C}$ проходит в другом интервале, сдвинутом вправо по времени тепловой обработки $\tau = 25200 \dots 27000\text{ с}$.

Несмотря на различия в функциях тепловой обработки, используемых в [4] и настоящей работе, следует отметить удовлетворительное согласование экспериментальных и расчётных данных, показывающее адекватность предлагаемого метода расчёта процесса твердения бетонного изделия в трёхмерной постановке.

Таблица 2. – Экспериментальные значения температур в точках E и F средней плоскости куба $0,3 \times 0,3 \times 0,3\text{ м}$, соответственно в 7 и 15 см от поверхности

Время, с	$T_0, ^{\circ}\text{C}$ (граница)	$T, ^{\circ}\text{C}$ (точка E)	$T, ^{\circ}\text{C}$ (точка F)	Время, с	$T_0, ^{\circ}\text{C}$ (граница)	$T, ^{\circ}\text{C}$ (точка E)	$T, ^{\circ}\text{C}$ (точка F)
0	15	15	15	28800	80	81	81,5
1800	29	16	16	30600	75	80,5	81
3600	40	18,5	17,5	32400	71	79	81
5400	45	21,5	20,5	34200	67	75	80,5
7200	49	26	24,5	36000	62	70,5	79,5
9000	62	33	30	37800	59,5	66,5	75,5
10800	80	52	41,5	39600	56	62	70,5
12600	80	67,5	59,5	41400	52	58	65,5
14400	80	77	71	43200	49,5	54,5	61
16200	80	80,5	78	45000	47	50,5	56
18000	80	81	79,5	46800	44	46,5	51,5
19800	80	81,5	80,5	48600	40	42,5	47
21600	80	82	81	50400	36	38,5	42
23400	80	82	81,5	52200	33	34,5	37
25200	80	81,5	82	54000	30	30,5	31,5
27000	80	81	82				

Заключение. На основе нестационарного уравнения теплопроводности в трёхмерной постановке, дополненного уравнениями, учитывающими теплоту гидратации, предложена математическая модель твердения тяжёлого бетона в условиях заданного температурного режима тепловой обработки на границе раздела системы «бетонное изделие в опалубке – тепловая среда». В качестве тестового объекта выбран бетонный куб с размерами $0,3 \times 0,3 \times 0,3\text{ м}$. На тестовом объекте системы сеточным методом выполнены численные расчёты распределения температур, коэффициента гидратации по объёму изделия в зависимости от времени тепловой обработки; получено удовлетворительное согласование расчётных данных с экспериментальными данными по температурам, взятыми из работы [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Нияковский, А.М. Формирование рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий при их модернизации / А.М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 93–98.
2. Ушеров-Маршак, А.В. Информационная технология бетона ускоренного твердения / А.В. Ушеров-Маршак, А.Г. Синякин // Бетон и железобетон. – 1994. – № 6. – С. 2–4.
3. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н.Б. Марьямов. – М. : Стройиздат, 1970. – 272 с.
4. Миронов, С.А. Ускорение твердения бетона / С.А. Миронов, Л.А. Малинина. – М. : Стройиздат, 1964. – 348 с.
5. Александровский, С.В. Расчёт бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учётом ползучести бетона / С.В. Александровский. – М. : НИИЖБ, 2004. – 712 с.
6. Васильев, П.И. Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений / П.И. Васильев, Ю.И. Кононов, Я.Н. Чирков. – Киев : Вища школа, 1982. – 320 с.
7. Дмитрович, А.Д. Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде / А.Д. Дмитрович. – М. : Стройиздат, 1967. – 243 с.
8. Modelling of heat of hydration for thick concrete constructions – a note / Bennet Kuriakose [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 42, No. 4, October – November. – P. 348–357.

9. Аксенчик, К.В. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер для тепловлажностной обработки железобетонных изделий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / К.В. Аксенчик. – Иваново, 2014. – 20 с.
10. Подгорнов, Н.И. Математическая формулировка задачи определения температуры бетона при термообработке в гелиокамерах типа «горячего ящика» / Н.И. Подгорнов, Д.Д. Коротеев // Вестник РУДН. – 2014. – С. 131–135. – (Серия «Инженерные исследования», № 1).
11. Василевский, К.К. Приближенное решение нелинейной нестационарной задачи тепло- и массообмена для полуграниченного пористого тела / К.К. Василевский // Теплофизика высоких температур. – 1964. – Т. 2, вып. 2. – С. 260–266.
12. Многочисленные решения в задачах управления нагревом твёрдых тел / И.Б. Сороговец [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73, № 5.
13. Дербасова, Е.М. Технология непрерывного изготовления железобетонных корпусов морских ледостойких платформ в условиях Каспийского моря на основе моделирования тепловых режимов отливки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.08.04 / Е.М. Дербасова ; Астрахан. гос. техн. ун-т. – Астрахань, 2015. – 20 с.
14. Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength in Field Applications : Research Report [Electronic resource] / J.M. Nixon [et al.] // Highway Research Center and Department of Civil Engineering at Auburn University. – 2008. – Mode of access: <http://www.eng.auburn.edu/files/centers/hrc/930-590-2.pdf>. – Date of access: 14.12.2018.
15. Carino, N. The Maturity Method: From Theory to Application [Electronic resource] / N. Carino, H. Lew // In Structures; Chang, P., ed.: American Society of Civil Engineers: Reston, VA, 1-19. – 2001. – Mode of access: <http://www.learncivilengineering.com/wp-content/uploads/2015/02/THE-MATURITY-METHOD-FROM-THEORY-TO-APPLICATION-1.pdf>. – Date of access: 14.12.2018.
16. Запорожец, И.Д. Тепловыделение бетона / И.Д. Запорожец, С.Д. Окороков, А.А. Парийский. – Л. : Стройиздат, 1967. – 317 с.
17. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрия цемента и бетона : Избр. тр. / А.В. Ушеров-Маршак. – Харьков : Факт, 2002. – 180 с.
18. Freiesleben Hansen, P., Pedersen, J. Curing of Concrete Structures / P. Freiesleben Hansen, J. Pedersen. – CEBS Information Bulletin 166. – 1985, May – 42 p.
19. Freiesleben Hansen, P., Pedersen J. Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete / P. Freiesleben Hansen, J. Pedersen // Nordisk Betong. – 1977. – № 1. – P. 19–34.
20. Температурные напряжения в массивных бетонных и железобетонных элементах энергетических сооружений / П.И. Васильев [и др.]. – СПб. : СПбГТУ, 1995. – 215 с.
21. De Schutter, G. General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement / G. De Schutter, L. Taerwe // Cement and Concrete Research. – 1995. – № 25 (3). – P. 593–604.
22. Zákoutsky, J. Effect of temperature on the early-stage hydration characteristics of Portland cement: A large-volume calorimetric study / J. Zákoutsky, V. Tydlitát, R. Cherny // Construction and Building Materials. – 2012. – № 36. – P. 969–976.
23. Чичко, А.Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов / А.Н. Чичко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2003. – № 2. – С. 42–48.

Поступила 18.12.2018

DEVELOPMENT OF A CONCRETE HARDENING PROCESS MATHEMATICAL MODEL BASED ON A THREE-DIMENSIONAL HEAT EQUATION

A. NIYAKOVSKI

The analysis of scientific publications devoted to mathematical modelling and calculation of hydration kinetics, formation of temperature fields during concrete hardening depending on heat treatment conditions is presented. A mathematical model based on a three-dimensional equation of non-stationary thermal conductivity is proposed, which allows to calculate the process of hardening of concrete products of complex geometric shape. The adequacy of the developed model was assessed on a symmetrical test product.

Keywords: *mathematical modeling, cement hydration kinetics, temperature fields, three-dimensional heat equation, non-stationary thermal conductivity, industrial heat engineering.*

УДК 691.32

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА СВОЙСТВ БЕТОНОВ С ВЫЯВЛЕНИЕМ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ («ОТСТРЕЛОВ») В КОНСТРУКЦИЯХ

канд. техн. наук, доц. **И.П. ПАВЛОВА**
(Брестский государственный технический университет)

Приведены результаты опытных исследований и теоретических изысканий возможных причин появления локальных дефектов в железобетонных конструкциях на стадии их эксплуатации в виде «отстрелов». Для достижения цели работы решены следующие задачи: определены основные характеристики сырьевых компонентов бетонных смесей (нормальная плотность, сроки схватывания и активность применяемых цементов, в том числе с применением пластифицирующих добавок; модуль крупности и пустотность песка); выполнен химический анализ содержания свободных СаО и MgO в цементе и бетоне; определен минералогический состав проб цемента; определено содержание зерен известняка в песке; проанализированы номинальные составы бетонных смесей, принятые на производстве, а также режимы тепловлажностной обработки.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, локальные дефекты, бетонные смеси, пластифицирующие добавки.

Введение. Повышение качества строительства, долговечность зданий и сооружений – общая цель для поставщиков сырья, потребителей материалов при производстве железобетонных конструкций и строителей при монтаже объектов. Среди проблем, негативно влияющих на качество, вырывы кусков бетона из бетонных конструкций, так называемые «отстрелы», участвовавшие за последние годы. И если исходить из того, что в стройиндустрии и при монолитном возведении объектов работают квалифицированные специалисты, то одним из важнейших факторов и гарантией качества становится качество строительных материалов. Масштабные программы строительства, высокие темпы ввода объектов требуют ускоренных сроков твердения бетона в монолитном домостроении, сокращения сроков тепловлажностной обработки изделий в производстве сборного железобетона. В таких условиях качества можно добиться только благодаря применению качественных материалов, соблюдая технологии и должный уход за бетоном на стадии твердения.

Цель настоящей работы – определение показателей качества сырьевых материалов для изготовления бетонов железобетонных конструкций, номинальных составов бетонных смесей, технологических факторов, что позволило установить фактические обстоятельства возникновения локальных «отстрелов» в железобетонных конструкциях на эксплуатируемых объектах.

1 Результаты исследования

1.1 Испытания проб цемента (ГОСТ 10178). В результате испытаний определены сроки схватывания и нормальная плотность, ГОСТ 310.3, прочность на растяжение при изгибе и прочность на сжатие, ГОСТ 310.4. При проведении испытаний использовались следующие пробы цемента (таблица 1): ПЦ 500-Д20 ГОСТ 10178; ПЦ 500-Д20 ГОСТ 10178. Для определения влияния на сроки схватывания также были заформованы образцы, модифицированные пластифицирующими добавками I группы «Хидетал ГП9-α», ТУ ВУ 490681049.005-2012; «Универсал П-4», ТУ ВУ 490681049.004-2012, изготовитель ООО «БелСКТ-Стандарт». Результаты испытаний отражены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Результаты испытаний проб цемента

№ п/п	Предприятие-изготовитель	ТНПА	Нормальная плотность, %	Сроки схватывания		Прочность на растяжение при изгибе		Прочность на сжатие	
				начало	конец	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
1	ОАО «Красносельскстройматериалы» Филиал № 1 «Цементный завод»	ПЦ 500-Д20 ГОСТ 10178	25,8	2 ч 30 мин	3 ч 10 мин	5,87	7,43	38,02	48,04
1-1	+Хидетал α (1,0% от массы цемента)			3 ч 20 мин	3 ч 50 мин	–	–	–	–
1-2	+Универсал П4 (1,0% от массы цемента в пересчете на сухое вещество)			3 ч 40 мин	4 ч 00 мин	–	–	–	–
2	ОАО «Белорусский цементный завод» (ОАО «БЦЗ»)	ПЦ 500-Д20 ГОСТ 0178	26,5	3 ч 15 мин	4 ч 10 мин	7,01	7,36	47,89	54,22
2-1	+Хидетал α (1,0% от массы цемента)			3 ч 10 мин	3 ч 50 мин				

Как видно из таблицы 1, минимальными сроками схватывания (40 мин) отличается ПЦ 500 Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы», причем начало схватывания у этого цемента также наступает раньше (2 ч 30 мин). Максимальное время схватывания (2 ч 55 мин) показала проба (изг. ОАО «БЦЗ»).

Данные исследований свидетельствуют о том, что четкое влияние нормальной густоты на сроки схватывания не прослеживается, вариации в сроках схватывания в этом случае в большей мере обусловлены химико-минералогическим составом представленных проб цемента.

Таблица 2. – Результаты испытаний проб цемента на прочность

Проба	Возраст образцов, сут	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Средняя прочность на растяжение при изгибе образцов в серии, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе, не менее, МПа, согласно ГОСТ 10178	Прочность на сжатие, МПа	Средняя прочность на сжатие образцов в серии, МПа	Предел прочности на сжатие, не менее, МПа, согласно ГОСТ 10178
ОАО «Красносельск-стройматериалы»	7	5,96	5,87		34,39	38,02	
		5,78			39,19		
		5,74			38,45		
					33,64		
					40,03		
	28	7,41	7,43	5,9	45,85	48,04	49,0
		7,45			45,58		
		7,11			48,24		
					47,21		
					49,64		
ОАО «Белорусский цементный завод»	7	6,72	7,01		46,64	47,89	
		6,98			39,02		
		7,03			46,80		
					45,23		
					49,19		
	28	7,30	7,36	5,9	54,89	54,22	49,0
		6,84			54,63		
		7,42			52,86		
					48,59		
					54,48		
			49,67				

Для выявления возможности применения цемента с модификацией химическими добавками исследовано изменение сроков схватывания ПЦ 500 Д20 (изг. ОАО «Красносельскстройматериалы») и ПЦ 500 Д20 (изг. ОАО «БЦЗ») при введении пластифицирующих добавок I группы (Хидетал ГП9-α и Универсал П4 соответственно). Данные добавки показали ускорение сроков схватывания. Так, сроки схватывания сократились до 20 мин для модифицированных составов на ПЦ 500 Д20 (40 мин – проба чистого цемента), но при этом время начала схватывания сдвинулось на 50 мин и 1 ч 10 мин соответственно для ГП9-α и Универсал П4 (см. таблицу 2). Кроме того, следует отметить замедление начала схватывания на 50 мин – 1 ч 10 мин для цемента ОАО «Красносельскстройматериалы», в то время как влияния пластифицирующих добавок на изменение начала схватывания у цемента ОАО «БЦЗ» не обнаружено. Следовательно, ПЦ изготовления ОАО «БЦЗ» является более сбалансированным по минералогии и менее чувствительным к введению пластифицирующих добавок.

Минимальную прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7 сут демонстрирует первая проба (ПЦ 500 Д20, изготовитель ОАО «Красносельскстройматериалы»), но к возрасту 28 сут прочность выравнивается и превосходит минимальное нормативное значение на 26%, как и для 2-й пробы цемента – прирост прочности составляет +25% к минимальному нормативному значению.

Минимальная прочность на сжатие в возрасте 7 сут также у пробы ОАО «Красносельскстройматериалы», при этом в возрасте 28 сут прочность у этой пробы меньше нормативного значения на 2%, т.е. проба данного цемента не соответствует заявленной марке.

Проба цемента, изготовленного ОАО «БЦЗ», показывает значения прочности выше нормативных. Прирост прочности для пробы в возрасте 28 сут к минимальному нормативному значению +10,7%.

1.2 Испытания песка (ГОСТ 8736). По основным показателям качества песок соответствует требованиям стандарта (таблица 3). Однако в песке обнаружено значительное количество зерен известняка (5...7%). Как известно, известняк – это мягкая осадочная порода органико-химического происхождения, состоящая в основном из кальцита (CaCO_3) и нередко содержащая примеси кварца, кремния, фосфата, песчаных и глинистых частиц. В состав карбонатной части известняка входят также до-

ломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, FeCO_3 и MnCO_3 (менее 1%), некарбонатные примеси – глинистые алюмосиликаты и минералы кремнезема (опал, халцедон, кварц), в небольших количествах оксиды, гидроксиды и сульфиды Fe, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaSO_4 . При этом водопоглощение известняка может достигать 2,1%.

Таблица 3. – Результаты испытаний песка

Наименование показателей	Фактическое значение		Требуемое значение
	частные	полные	
Зерновой состав, остатки на ситах, %			
10 мм	0,8	–	5
5 мм	5,7	–	15
2,5 мм	8,53	8,53	
1,25 мм	9,49	18,02	
0,63 мм	26,26	44,28	30...45
0,315 мм	25,39	69,67	
0,16 мм	16,46	86,13	
Проход через сито с сеткой № 016, %	13,87		15
Модуль крупности	2,27		2,5...2,5
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	2,9		Не более 3,00
Содержание глины в комках, %	отсутствует		Не более 0,5
Насыпная плотность, кг/м^3	1310		
Класс песка и группа песка	II класс, группы по крупности «средний»		ГОСТ 8736

Если применение известкового щебня не имеет таких негативных эффектов вследствие низкой удельной поверхности последнего, мелкие частицы известковых включений в песке за счет адсорбции воды из структуры бетона набухают и начинают расширяться. Это приводит к возникновению напряжений расширения, что совместно с «мягкостью» минеральной составляющей породы может привести к дроблению частицы и локальным приповерхностным отстрелам конусообразной формы (рисунок 1).

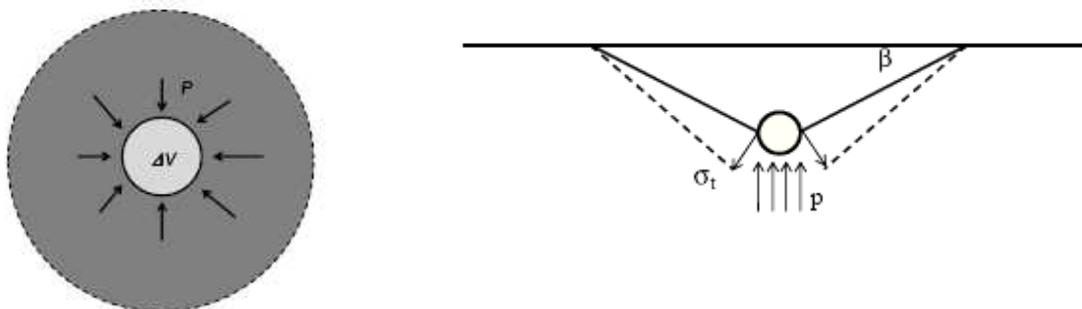


Рисунок 1. – Схематичное представление разрушения поверхностного слоя из-за напряжений расширения, возникающих при набухании включения известняка

1.3 Определение содержания CaO и MgO и расчет минералогического состава¹. Навеска бетонного образца массой 1 г помещалась в колбу с объемом дистиллированной воды 100 мл. Для полного растворения свободного кальция вытяжка выдерживалась сутки в естественных условиях, с периодическим перемешиванием. Дальнейшие исследования вытяжек из образцов проводились по стандартным методикам (ГОСТ- 2374-02 «Вода питьевая», ГОСТ 31957 -2012).

Результаты исследования представлены в таблице 4, данные которой свидетельствуют о том, что значение pH зависит от содержания кальция в бетонной вытяжке. В системе «цементный камень – вода» количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в поргланцементном камне после 1 месяца твердения составляет 9...11%, а после 3 месяцев – 15% массы цементного камня. В бетоне при избытке CaO и образовавшейся в результате гидратации силикатов кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ создаются условия для интенсивной карбонизации. В то же время в результате процессов карбонизации уменьшается щелочность, т.е. значение pH (это вытяжки с поверхности образцов бетона с добавками, с низкими значениями pH).

Если конструкции попадают под воздействие увлажнения (к примеру, ремонтные работы – шпатлевание и т.п.), то на поверхности могут протекать реакции нейтрализации между кислотой и щелочными компонентами. Образовавшийся известняк в связи с высокой удельной поверхностью быстро превращается в легкорастворимое соединение гидрокарбонат кальция. Эта реакция сильно зависит от температуры

¹ Исследования проводились при непосредственном участии Н.В. Левчук, доцента кафедры инженерной экологии и химии Брестского государственного технического университета.

и обратима. Вследствие этого на поверхности постоянно происходят процессы растворения и повторной кристаллизации карбоната кальция. Водорастворимый гидрокарбонат кальция мигрирует по капиллярам в другие области структуры материала. Повышение температуры способствует кристаллизации.

Таблица 4. – Результаты испытаний проб цемента, бетона, отобранных на заводе-изготовителе, и из дефектного участка на объекте

Пробы	Исследуемые показатели		
	pH	Ca ²⁺ (г/кг)	Mg ²⁺ (г/кг)
М500 Д20 (изг. ОАО «Красносельскстройматериалы»)	12,00	328,00	40,00
М500 Д20 (изг. ОАО «БЦЗ»)	12,29	304,00	24,00
Бетон с добавкой Универсал П4 (с завода)	9,70	8,00	22,00
Бетон с добавкой Хидетал ГП-9α (с завода)	10,68	10,00	10,00
Проба из дефектного участка	10,30	28,00 общая	

Как видно из таблицы 4, максимальное количество CaO и MgO наблюдается в пробах негидратированного цемента, причем ПЦ производства Красносельскстройматериалы отличается повышенным содержанием MgO. Повышенное содержание MgO в виде пережженного остеклованного периклаза чревато поздним трещинообразованием вследствие медленного гашения, которое может растянуться на годы. Однако его количество в бетоне с течением времени снижается (см. таблицу 4) и только проба бетона с Универсалом П4 показала несколько завышенное значение, что обосновано скорее применяемым для изготовления этого бетона цементом, а не химической добавкой.

Анализ пробы из дефектного участка показал, что общее количество оксидов CaO и MgO не превышает значений для проб бетонов, отобранных на заводе-изготовителе.

По химическому составу портландцементный клинкер (% по массе) в основном состоит из следующих компонентов: CaO – 64...67; SiO₂ – 21...25; Al₂O₃ – 4...8; Fe₂O₃ – 2...4. Кроме того, в состав клинкера обычно входят (% по массе): 0,5...1 щелочей (Na₂O + K₂O); 0,5...5 MgO; 0,1...0,3 TiO₂; 0,1...0,3 P₂O₅.

Рациональный состав клинкера зависит от условий работы конкретного завода, состава обжигаемой смеси, вида топлива, типа печей и т.д. При его подборе руководствуются следующими положениями:

- для получения в обжигаемом материале необходимого количества жидкой фазы суммарное содержание C₃A + C₄AF, которые расплавляются в зоне спекания, надо поддерживать в пределах 18...22% при содержании 5...8% C₃A;

- при рекомендуемом содержании минералов-плавней рациональные пределы для суммы C₃S + C₂S составят 75...78% при содержании C₃S 52...62% и C₂S 14...24%.

Результаты расчета минералогического состава представлены в таблице 5.

Поскольку клинкер помимо основных минералов содержит некоторое количество и других соединений, то сумма C₃S + C₂S + C₃A + C₄AF обычно составляет 96...98%.

Таблица 5. – Расчет минералогического состава

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	MgO	SO ₃	п.п.п.	Na ₂ O	K ₂ O
ПЦ М500 Д20*	20,38	5,04	3,35			63,73	1,87	2,53		0,87	

* – Цемент изготовителя ОАО «Красносельскстройматериалы».

$$C_3S = 4,07CaO - 7,6SiO_2 - 6,7Al_2O_3 - 1,42Fe_2O_3 = 65,97;$$

$$C_3A = 2,65(Al_2O_3 - 0,64Fe_2O_3) = 7,67; \quad C_4AF = 3,04Fe_2O_3 = 10,18.$$

Как видно из расчетов, данный цемент имеет повышенное содержание алита C₃S при несколько заниженном содержании белита C₂S, что при гидратации приведет к повышенному выделению гидроксида кальция (см. реакции ниже).

Сразу после затворения цемента водой начинаются химические реакции. Уже в начальной стадии гидратации цемента происходит быстрое взаимодействие алита с водой, сопровождающееся образованием гидросиликата кальция и гидроксида:



После затворения гидроксид кальция образуется из алита, так как белит гидратируется медленнее алита и при его взаимодействии с водой выделяется меньше Ca(OH)₂, что видно из уравнения реакции:



Гидросиликат кальция $3\text{CaO} - 2\text{SiO}_2 - 3\text{H}_2\text{O}$ образуется при полной гидратации чистого трехкальцевого силиката в равновесии с насыщенным раствором гидроксида кальция. Молярное соотношение CaO/SiO_2 в гидросиликатах, образующихся в цементном тесте, может изменяться в зависимости от состава материала, условий твердения и других обстоятельств. Поэтому применяется термин C–S–H для всех полукристаллических и аморфных гидратов кальциевых силикатов, относимых к гелевой фазе.

Коэффициент насыщения:

$$KH = \frac{\% \text{CaO}_{\text{общ}} - 1,65 \% \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,35 \% \text{Fe}_2\text{O}_3}{2,8 \% \text{SiO}_2} = \frac{63,73 - 1,65 \cdot 5,04 - 0,35 \cdot 3,35}{2,8 \cdot 20,38} = 0,95.$$

Если коэффициент насыщения $KH = 1$, то извести в клинкере достаточно, чтобы весь SiO_2 превратился в C_3S . При $KH < 1$ в клинкере будут присутствовать C_3S и C_2S , а при $KH = 0,67$ силикаты представлены только C_2S . Практически $KH = 0,88 \dots 0,92$.

Силикатный (кремнеземный) модуль показывает отношение содержания в клинкере диоксида кремния к сумме оксидов алюминия и железа:

$$n = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{20,38}{5,04 + 3,35} = 2,43.$$

Для обычного портландцемента $n = 1,9 \dots 2,6$. Высокий силикатный модуль показывает, что в клинкере относительно много силикатов кальция C_3S и C_2S , но мало алюминатных соединений.

Глиноземный (алюминатный) модуль характеризует отношение содержания в клинкере глинозема к оксиду железа

$$p = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{5,04}{3,35} = 1,50.$$

Для обычных портландцементов $p = 0,9 \dots 1,6$. При высоком глиноземном модуле клинкер отличается повышенным содержанием C_3A и относительно малым количеством C_4AF . Если глиноземный модуль мал, значительная часть глинозема связана в виде C_4AF .

Результаты расчета минералогического состава представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Расчет минералогического состава

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	$\text{CaO}_{\text{св}}$	CaO	MgO	SO_3	п.п.п.	Na_2O	K_2O
ПЦ М500 Д20*	21,53	5,33	3,90		0,8	65,88	1,55	0,45			0,69

* – Цемент изготовителя ОАО «Белорусский цементный завод».

$$\text{C}_3\text{S} = 66,51; \quad \text{C}_2\text{S} = 15,0; \quad \text{C}_3\text{A} = 7,51; \quad \text{C}_4\text{AF} = 11,86.$$

Таким образом, расчет минералогического состава показал, что для данного цемента характерен более сбалансированный минералогический состав. Коэффициент насыщения $KH = 0,94$. Силикатный (кремнеземный) модуль $n = 2,33$. Глиноземный (алюминатный) модуль: $p = 1,37$.

1.4 Анализ номинальных составов бетона и режимов тепловлажностной обработки

Таблица 7. – Номинальные составы бетона (предоставлены лабораторией завода КПД)

Конструктивные элементы	Расход материалов на 1 м ³ бетонной смеси					В/Ц
	цемент, кг	песок, кг	щебень фр. 5...20, кг	вода, л	добавка (0,5%, 10% концентрации), кг	
Внутренние стеновые панели ВС, С12/15, отпускная прочность 85%	343	940 (W5%)	930	165	17,2	> 0,6*
Наружные стеновые панели НС, С25/30, отпускная прочность 90%	465	635	1150	160	25	0,39
Плиты перекрытий П, С12/15, отпускная прочность 85%	335	800	1160	155	2,2 (Хидетал ГП 9α)	0,46

* – В/Ц рассчитано с учетом воды, содержащейся во влажном песке и химической добавке.

Как видно из таблицы 7, рассмотренные составы бетона рациональны, но для внутренних стеновых панелей наблюдается повышенный расход воды.

Режимы тепловлажностной обработки

Внутренние стеновые панели ВС. Режим тепловой обработки: подъем 4 ч (70 °С); изотермическая выдержка 7 ч, выдержка 9 ч.

Наружные стеновые панели НС. Камера предварительной сушки: 1 ч 10 мин при 40...60 °С; камера тепловой обработки – 14 ч при 60 °С.

Плиты перекрытий П – камера предварительной сушки: при 40...60 °С – 1 ч 10 мин, камера тепловой обработки – при 60 °С 14 ч.

Режимы тепловой обработки подобраны с учетом снятия критических напряжений в твердеющей структуре и не являются причиной последующих «отстрелов».

Выводы и рекомендации

Анализ результатов комплексного исследования сырьевых материалов и бетонов на их основе для производства железобетонных изделий и конструкций завода крупнопанельного домостроения сделаны следующие обобщающие *выводы*:

1. Дефекты в виде локальных «отстрелов» и вздутий на поверхности железобетонных изделий могут быть отнесены к категории «косметических» дефектов, не влияющих на эксплуатационную надежность конструкции.

2. Испытания сырьевых материалов позволили выявить следующее:

- пробы цемента соответствуют показателям качества по ГОСТ 10178 (сроки схватывания и нормальная густота, ГОСТ 310.3; прочность на растяжение при изгибе и прочность на сжатие, ГОСТ 310.4), кроме активности ПЦ М500 Д20 (изг. ОАО «Красносельскстройматериалы») – прочность на сжатие в возрасте 28 суток для данной пробы ниже минимального нормативного значения. Кроме того, эта же проба демонстрирует сокращенные сроки схватывания (40 мин);

- введение пластифицирующих добавок I группы значимого эффекта на свойства цементной системы не оказывает, кроме некоторого сокращения сроков схватывания;

- исследование цементных вытяжек на содержание СаО и MgO показало, что максимальное количество вышеуказанных оксидов наблюдается в пробах негидратированного цемента, причем ПЦ производства Красносельскстройматериалы отличается повышенным содержанием MgO. Повышенное содержание MgO в виде пережженного остеклованного периклаза чревато поздним трещинообразованием вследствие медленного гашения, которое может растянуться на годы. Количество данных оксидов в бетоне с течением времени снижается, только проба бетона с комплексной добавкой «Универсал П4» показала несколько завышенное значение суммарного содержания оксидов СаО и MgO, что обусловлено применением цемента с определенным минералогическим составом. Химическая добавка влияния на изменение содержания оксидов СаО и MgO не оказывает. Анализ пробы из дефектного участка свидетельствует, что общее количество оксидов СаО и MgO не превышает значений для проб бетонов, отобранных на заводе;

- минералогический состав цемента производства ОАО «Красносельскстройматериалы» имеет повышенное содержание алита C_3S при несколько заниженном содержании белита C_2S , что при гидратации приведет к повышенному выделению гидроксида кальция как источника карбонатной коррозии. Цемент завода ОАО «БЦЗ» имеет более сбалансированный минералогический состав;

- исследование основных характеристик применяемого песка позволяет сделать вывод, что песок соответствует II классу, группе по крупности «средний». При этом в песке обнаружено значительное количество зёрен известняка (5...7%), которые за счет адсорбции воды из структуры бетона набухают и начинают расширяться, что может привести к дроблению частицы и к локальным приповерхностным отстрелам конусообразной формы;

- применяемые на производстве составы бетона рациональны по расходам вяжущего и инертных, однако следует откорректировать водоцементное отношение для бетона, применяемого для изготовления внутренних стеновых панелей;

- принятые режимы тепловлажностной обработки на выявленные дефекты в виде «отстрелов» не влияют.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что основополагающей причиной «отстрелов» явилось наличие в песке зёрен известняка. При этом косвенное влияние может оказать также цемент с несбалансированным химико-минералогическим составом, особенно опасно наличие повышенного содержания MgO как источника «медленного гашения».

Для дальнейшей бездефектной эксплуатации необходим комплекс следующих мероприятий:

- рассмотреть возможность замены песка на другой с пониженным содержанием известковых и доломитизированных включений (не более 3% по массе);

- применять на производстве бетонные смеси с водоцементным отношением, не превышающим 0,45, что достижимо с учетом применения пластифицирующих добавок I группы;

- если не представляется возможным изменить сырьевой источник песка, следует рассмотреть возможность введения минимального количества воздухововлекающих добавок с целью перераспределения лишней воды и снижения концентрации напряжения от набухания заполнителя;
- предусмотреть технологические приемы по снижению количества воды в бетонной смеси, в частности применение низкоподвижных или жестких бетонных смесей;
- финишная отделка лицевого слоя изделий должна производиться без добавления воды;
- следует предохранять поверхность изделий от потери влаги во время твердения. Возможно, следует предусмотреть защиту поверхности изделий пленкообразующими паропроницаемыми («дышащими») составами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смеси бетонные. Технические условия : СТБ 1035-96. – Минск, 1997. – 12 с.
2. Здания и сооружения. Техническое состояние и обслуживание строительных конструкций и инженерных систем и оценка их пригодности к эксплуатации. Основные требования : ТКП 45-1.04-208-2010 (02250). – Минск, 2010. – 22 с.
3. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости : ГОСТ 12730.0-78. – М. : Стройиздат, 1980. – 3 с.
4. Бетон : СТБ EN 206-1-2011. Ч. 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие. – Минск, 2012. – 67 с.
5. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с изменением № 1) : ГОСТ 15467-79. – М. : Стройиздат, 1979. – 12 с.
6. Лещинский, М.Ю. Испытание бетона / М.Ю. Лещинский // Справ. пособие. – М. : Стройиздат, 1980. – 360 с.

Поступила 21.12.2018

RESEARCH AND ASSESMENT CONCRETE PROPERTIES WITH DETECTION POSSIBLE REASON OF STRUCTURE POP-OUTS

I. PAULAVA

In article experiment researches results and theoretical assessment of possible reason local structure defects in steel concrete frames on the service life stage in the form of pop-outs are presented. For work goal achievement was determine next tasks: are defined main characteristics of primary goods (normal density, setting time and activity of used cements, including usage of superplasticizers; fineness modulus and voidage of sand); chemical analysis of free CaO and MgO in cement and concrete are accomplished; mineralogical composition for cement samples is identified; quantity of limestone grains in the sand are determinate; nominal concrete mix and heat treatment conditions are analyzed.

Keywords: reinforced concrete structure, local defects of the concrete mix, the plasticizing additives.

УДК 666.973.2

СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ НА ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ ИЗ ОЧЕСОВ ЛЬНА

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

Установлены основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных плит на основе очесов волокна льна. Приведена технология получения образцов для определения физико-механических показателей утеплителей. Предложена методика по исследованию водостойкости волокнистых теплоизоляционных материалов. Реализован трехфакторный эксперимент по плану Бокса. По итогам эксперимента получены полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкости теплоизоляционных материалов из льняных очесов. Для анализа полученных результатов построены однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что средняя плотность оказывает наибольшее влияние на давление формования, показатель теплопроводности и прочность на сжатие, а количество добавки в общем расходе вяжущего – на водостойкость материала.

Ключевые слова: теплоизоляционные плиты, очесы льна, жидкое натриевое стекло, известь, гипс.

Введение. Отрасль строительных материалов в настоящее время ориентируется на создание новых эффективных утеплителей, что обусловлено стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы. Технологии по утилизации отходов растениеводства для стеновых и теплоизоляционных материалов реализуются во многих странах, что указывает на значительный интерес и востребованность данного направления в строительной отрасли. Существенный сегмент в производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь занимает растениеводство, включая выращивание льна. Так, в Беларуси сосредоточено более 20% льняных посевов на Европейском континенте. В 2017 году урожайность льноволокна составила 9,2 ц/га, наибольшая урожайность отмечалась в 2014 году – 10,7 ц/га [1].

Сбор урожая и дальнейшая переработка льна для получения волокон – достаточно трудоемкий процесс. При уборке льна комбайнами производится механизированный расстил соломки на льнище. Отделению волокнистой части стебля от древесины способствует роса, дожди и тепло, разрушающие соединительные ткани. Далее льняное сырье поступает на льнозаводы для первичной переработки льна [2]. При обработке льняной тресты свыше одной трети всего волокна уходит в отходы трепания. После обычного протряхивания от костры часть отходов используется как пакля. Большую часть отходов тщательно обрабатывают в потоке на специальной линии машин по производству короткого волокна, состоящей из специальной сушилки, трясилки, куделеприготовительной машины. Здесь льняные отходы окончательно очищают от древесины. Для повышения качества волокна чистое короткое и длинное волокно после оценки и подвязки отвозят на склад для отлежки. Затем волокно проходит контрольную сортировку и отправляется на льняные комбинаты или фабрики [3]. В результате чесания трепаного льна получают от 45 до 55% чесаного льна, 40...50% очесов и около 5% костры.

В настоящее время в Полоцком государственном университете в лабораториях кафедры строительного производства проводятся исследования по определению физико-механических характеристик теплоизоляционных материалов с наполнителем из очесов волокна льна. Основные физико-механические показатели утеплителей на основе льняных очесов приведены в научных работах [4; 5] Теплоизоляционные плиты на основе данного наполнителя, включающие натриевое жидкое стекло и добавки из извести и гипса, являются экологически чистыми и безопасными для жизнедеятельности человека. Применение льняных очесов для изготовления плит решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки и расширяет номенклатуру эффективных утеплителей из льняных волокон наравне с такими производимыми в Беларуси и России теплоизоляционными материалами, как «Экотерм», «Экотеплин» [6–8].

Методика эксперимента. Основной комплекс исследований по определению физико-механических характеристик теплоизоляционных плит проводился на наполнителе из очесов льна. В качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло с добавками из извести и гипса. При изготовлении исследуемых образцов соблюдали определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. После чего в жидкое стекло вводили известь, перемешивая до однородной консистенции, затем добавляли гипс. В результате перемешивания модифицированного жидкого стекла льняными очёсами и формовки получали экспериментальные образцы теплоизоляционного материала. Образцы выдерживали в форме 6 часов при температуре 20 ± 2 °С, затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45...55 °С.

Среднюю плотность и теплопроводность определяли согласно ГОСТ 17177 [9] и СТБ 1618 [10] соответственно на образцах-плитах размером 250×250×30 мм. Прочность на сжатие при 10%-ной деформации исследовали на образцах-кубах размером 100×100×100 мм по ГОСТ 17177 [9].

Водостойкость теплоизоляционного материала определяли на образцах-кубах размером 100×100×100 мм. За основу принята методика, приведенная в испытаниях Н.В. Давыденко [11]. Отформованные образцы высушивали при температуре 20±2 °С, а по достижении постоянной массы охлаждали и полностью погружали в воду. Температуру воды в ёмкости поддерживали в пределах 18±2 °С.

Через 2 часа образцы извлекали из емкости. Для удаления излишков воды образцы-кубы помещали на металлическое сито диаметром 1,25 мм на 15 минут. Затем образцы помещали в сушильный шкаф и по достижении постоянной массы взвешивали. Далее кубы вновь погружали в емкость с водой, высушивали и взвешивали. Количество опытов определялось постоянством массы трех последовательно высушенных образцов утеплителя. Изменение массы кубов выражали в процентах. Относительный показатель водостойкости теплоизоляционного материала определяли по величине изменения массы образцов-кубов в сухом состоянии (до начала эксперимента) и после высушивания (после проведения исследования).

Результаты и обсуждение. По результатам комплексных исследований установлено, что основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на физико-механические характеристики разработанных теплоизоляционных плит на основе очесов льна, являются плотность утеплителя, расход вяжущего и количество добавки. Установленные в результате исследований границы варьирования факторов для плит из очесов льна позволили реализовать трехфакторный эксперимент по плану Бокса ($n_0 = 1$). Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование факторов	Единицы измерения	Обозначения в кодированных переменных	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
			-1	0	+1	
Плотность	кг/м ³	X_1	40	80	120	40
Расход вяжущего	массовая доля	X_2	0,08	0,14	0,2	0,06
Количество добавки в общем расходе вяжущего	массовая доля	X_3	0,06	0,1	0,14	0,04

Обработка опытных данных выполнена методом регрессионного анализа с применением программы «Statistica» [12]. Произведенная проверка значимости найденных коэффициентов регрессии позволила получить полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкости теплоизоляционных плит из очесов волокна льна. Полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных имеют следующий вид:

- *давление формования:*

$$Y_1 = 0,354 + 0,265 \cdot X_1 - 0,028 \cdot X_2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (1)$$

- *коэффициент теплопроводности:*

$$Y_2 = 0,0373 + 0,0008 \cdot X_1 + 0,0017 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1^2 + 0,0009 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (2)$$

- *предел прочности на сжатие при 10%-ной деформации:*

$$Y_3 = 0,2675 + 0,142 \cdot X_1 + 0,019 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_3 - 0,0175 \cdot X_1^2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2; \quad (3)$$

- *водостойкость:*

$$Y_4 = 94,02 + 0,54 \cdot X_1 + 0,31 \cdot X_2 + 4,67 \cdot X_3 - 0,42 \cdot X_1^2 - 2,17 \cdot X_3^2 + 0,29 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (4)$$

Для установления степени влияния факторов на выходные параметры (давление формования, коэффициент теплопроводности, предел прочности на сжатие при 10%-ной деформации, водостойкость) построены однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала при нулевых значениях остальных факторов и нулевом значении свободного члена уравнения. Зависимости влияния изменения факторов на исследуемые выходные параметры приведены на рисунках 1–4.

Анализ графика влияния переменных на давление формования (рисунок 1) показал, что с повышением средней плотности (X_1) и уменьшением расхода вяжущего (X_2) исследуемый выходной параметр (Y_1) увеличивается по линейному закону. Наибольшее влияние факторов наблюдается при граничных условиях. При этом плотность (X_1) оказывает наибольшее влияние на давление формования (Y_1), а расход вяжущего (X_2) – наименьшее.

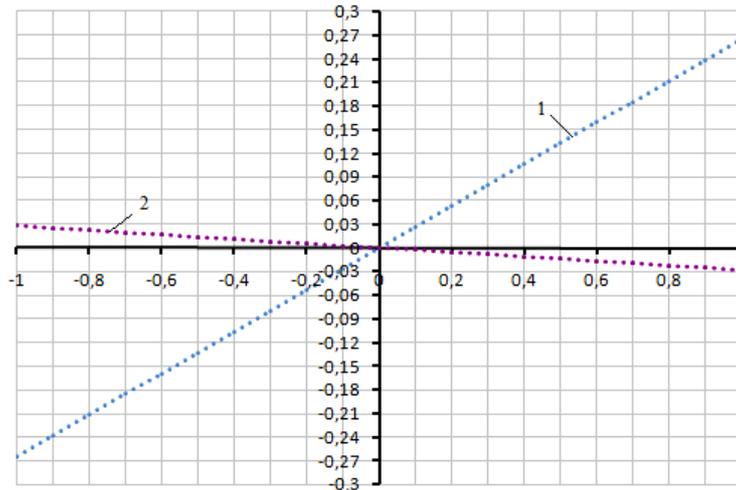


Рисунок 1. – Изменение давления формования по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2)

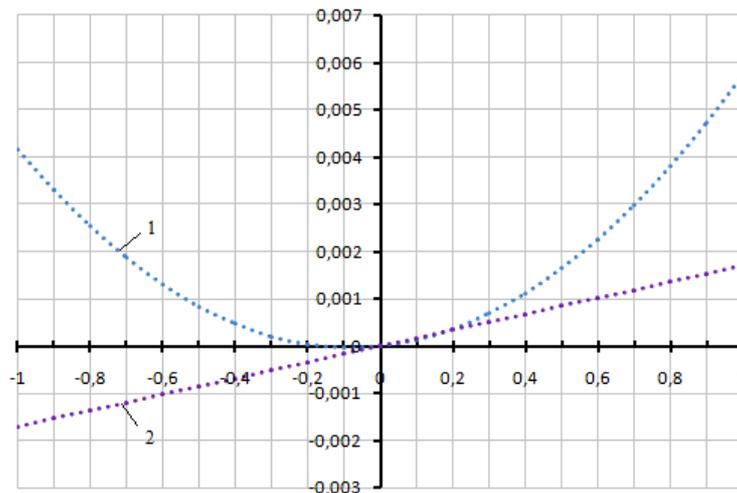


Рисунок 2. – Изменение коэффициента теплопроводности по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2)

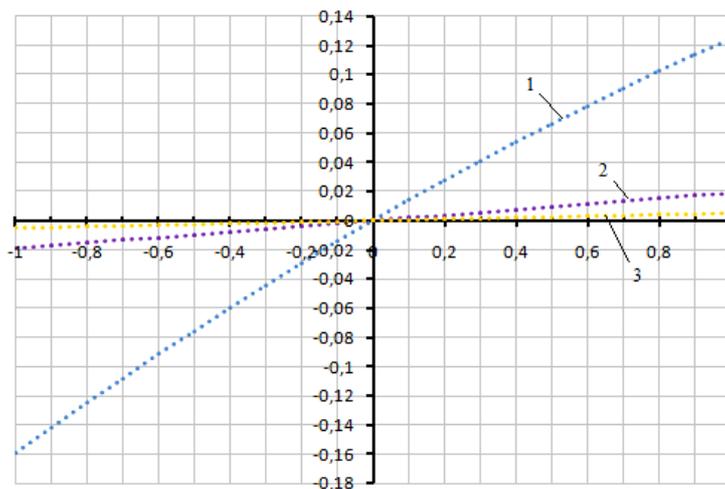


Рисунок 3. – Изменение прочности на сжатие при 10%-ной деформации по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2), количества добавки в общем расходе вяжущего (3)

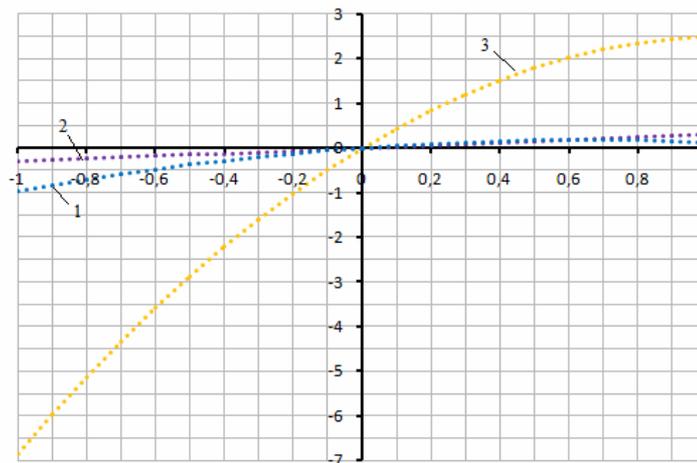


Рисунок 4. – Изменение водостойкости по однофакторным моделям влияния средней плотности (1), расхода вяжущего (2), количества добавки в общем расходе вяжущего (3)

Из приведенного графика влияния факторов (X_1 и X_2) на коэффициент теплопроводности (Y_2) (см. рисунок 2) следует, что увеличение расхода вяжущего (X_2) оказывает отрицательное влияние на параметр (Y_2) и приводит к линейному изменению теплопроводности (Y_2). Наибольшее влияние из двух факторов на показатель теплопроводности (Y_2) оказывает средняя плотность (X_1). В зависимости от величины входной переменной (X_1) коэффициент теплопроводности (Y_2) изменится по параболическому закону. В диапазоне изменения фактора (X_1) от -1 до $-0,1$ величина теплопроводности (Y_2) уменьшается, а в диапазоне от $-0,1$ до $+1$ значение теплопроводности (Y_2) повышается. Из условия необходимости снижения выходного параметра (Y_2) удовлетворяющая требованию величина средней плотности (X_1) находится в диапазоне от $-0,3$ до $+0,1$ изменения фактора (X_1).

Анализ графика влияния входных переменных на показатель прочности при 10%-ной деформации (см. рисунок 3) можно сделать вывод о том, что увеличение средней плотности (X_1), расхода вяжущего (X_2), количества добавки в общем расходе вяжущего (X_3) приводит к повышению прочности (Y_3). Причем фактор (X_1) оказывает наибольшее влияние из всех трех факторов на увеличение прочностных характеристик материала. Прирост входных переменных (X_2) и (X_3) приводит к линейному повышению показателя прочности на сжатие при 10%-ной деформации (Y_3).

Полученный график изменения водостойкости от трех факторов (см. рисунок 4) свидетельствует о том, что увеличение расхода вяжущего (X_2) и количества добавки (X_3) приводит к возрастанию величины выходного параметра (Y_4). Повышение водостойкости происходит по линейной зависимости при увеличении переменной (X_2). Прирост выходного параметра (Y_4) наблюдается при повышении факторов (X_1) и (X_3) по параболической зависимости с экстремумом в точке $+1$ при изменении количества добавки в общем расходе вяжущего (X_3) и в точке $+0,6$ при изменении средней плотности (X_1). При этом наибольшее влияние на водостойкость материала (Y_4) оказывает фактор (X_3).

Совместный анализ полученных графиков позволил выявить следующие зависимости:

- *увеличение средней плотности (X_1)* приводит к повышению давления формования, прочности на сжатие при 10%-ной деформации по линейной зависимости, водостойкости материала по параболической кривой с экстремумом в точке $+0,6$, при этом коэффициент теплопроводности уменьшается по параболической зависимости с экстремумом в точке $-0,1$;

- *возрастание фактора (X_2)* приводит к увеличению значений выходных параметров (Y_2), (Y_3), (Y_4), при этом давление формования (Y_1) снижается. Влияние расхода вяжущего (X_2) на все исследуемые параметры происходит по линейному закону. При повышении количества добавки в общем расходе вяжущего (X_3) наблюдается увеличение прочности на сжатие по линейной зависимости и водостойкости материала по параболической кривой с экстремумом в точке $+0,6$. Следует отметить что наибольшее влияние на среднюю плотность (Y_1), расход вяжущего (Y_2), прочность на сжатие при 10%-ной деформации (Y_3) оказывает средняя плотность (X_1), а на водостойкость материала (Y_4) переменный параметр (X_3).

Таким образом, из анализа полученных данных следует, что давление формования напрямую зависит от средней плотности теплоизоляционных плит. Утеплитель, характеризующийся минимальной плотностью, обладает рыхлой волокнистой структурой со значительным количеством пустот, в том числе и сквозных. При повышении количества волокнистого заполнителя необходимо большее давление формования для уплотнения материала. Максимальное давление обеспечивает минимальную пустотность в виде отдельных локализованных микропустот в материале за счет увеличения количества и общей пло-

шади точек контакта между очесами льна в результате сближения волокон и более плотного прилегания друг к другу. Уменьшение давления формования при возрастании плотности в связи с увеличением расхода вяжущего обусловлено снижением жесткости структурного каркаса из льняных очесов, вызванное смачиваемостью волокон водой, содержащейся в вяжущем, что приводит к развитию временной пластичности и гибкости очесов волокна льна.

Значительное влияние на теплоизолирующую способность материала оказывает средняя плотность и расход вяжущего. Перенос потоков воздуха при малой плотности утеплителя связан с образованием сетчатой структуры со сквозными пустотами по причине недостаточно плотного прилегания волокон друг к другу. Постепенное уменьшение теплопроводности с возрастанием средней плотности за счет увеличения количества заполнителя обусловлено повышением количества соприкосновений волокон между собой, что приводит к снижению объема и размеров пустот с одновременной локализацией на отдельные замкнутые микропространства, не сообщающиеся друг с другом. При этом в замкнутых микропространствах отсутствует циркуляция воздуха. Дальнейший прирост плотности приводит к постепенному повышению коэффициента теплопроводности в результате образования плотной, жесткой структуры с минимальным количеством микропустот и возрастающим количеством не точечных, а сплошных контактов между волокнами. Приращение плотности при повышении расхода вяжущего оказывает отрицательное влияние на теплопроводность материала из-за увеличения толщин оболочек из натриевого жидкого стекла, которые покрывают волокна, вследствие чего проводится большее количество тепла. Постепенно утолщенные оболочки начинают выполнять функцию мостиков холода на микроуровне.

Низкие прочностные характеристики при небольшой плотности материала объясняются формированием рыхлой сетчатой волокнистой структуры, содержащей большой объем пустот и малым количеством контактных точек между волокнами. Прирост прочности при возрастании средней плотности обусловлен образованием более плотной структуры материала по причине повышения расхода заполнителя, что влечёт за собой приращение количества и увеличение общей площади точек контакта между волокнами. Повышение прочности при увеличении расхода натриевого жидкого стекла вызвано приращением жесткости волокнистого каркаса, в частности каждого волокна за счёт формирования узловых клеевых соединений с большим содержанием вяжущего в контактных точках и увеличения толщины оболочек, выполняющих функцию армирующего слоя относительно волокнистой структуры.

При погружении в емкость с водой в структуре образцов утеплителя постепенно происходит растворение натриевого жидкого стекла. Потеря прочности объясняется уменьшением толщины с последующим полным растворением оболочек из жидкого стекла вокруг волокон, а также в результате разрушения узловых клеевых соединений из вяжущего в контактных точках. В процессе водонасыщения и растворения натриевого жидкого стекла удерживает в своей структуре воду, что отрицательно сказывается на теплоизолирующей способности теплоизоляционного материала. Добавки из извести и гипса препятствуют растворению жидкого стекла, образуя водостойкое модифицированное вяжущее, что предотвращает разрушение и сохраняет физико-механические характеристики утеплителя на основе очёсов льна.

Заключение. По результатам исследований установлено, что на основе очёсов волокна льна возможно получить теплоизоляционные плиты при давлении формования $0,1 \dots 0,67 \cdot 10^{-2}$ МПа плотностью $40 \dots 120$ кг/м³, обладающие коэффициентом теплопроводности $0,035 \dots 0,046$ Вт/(м·°С), прочностью на сжатие при 10%-ной деформации $0,1 \dots 0,43 \cdot 10^{-2}$ МПа и водостойкостью $85 \dots 96\%$.

Однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала, построенные по полиномиальным моделям, позволили установить общие зависимости влияния факторов на основные показатели теплоизоляционных плит. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что прирост плотности приводит к увеличению давления формования, прочности на сжатие при 10%-ной деформации по линейному закону и снижению коэффициента теплопроводности по параболической зависимости. С возрастанием расхода вяжущего по линейной зависимости уменьшается давление формования и повышается теплопроводность, прочность на сжатие и водостойкость. Приращение количества добавки в общем расходе вяжущего приводит к увеличению прочности по линейному закону и водостойкости материала по параболической кривой.

Из анализа полиномиальных моделей следует, что наибольшую степень влияния на давление формования, показатель теплопроводности, прочность на сжатие при 10%-ной деформации оказывает средняя плотность, а на водостойкость – количество добавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганов, А.Р. Современное состояние растениеводства Республики Беларусь / А.Р. Цыганов, Л.А. Веремейчик // Научные инновации – аграрному производству : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию юбилею Омского ГАУ, Омск, 21 февр. 2018 г. / Омский гос. аграр. ун-т им. П.А. Столыпина, 2018. – С. 515–520.

2. Живетин, В.В. Лён. Вчера, сегодня, завтра / В.В. Живетин, Л.Н. Гинзбург, А.И. Рыжов. – М. : Колос, 1967. – 29 с.
3. Рогаш, А.Р. Льноводство / А.Р. Рогаш, Н.Г. Абрамов, Я.А. Лебедев. – М. : ИПО Пилиграм, 1995. – 544 с.
4. Romanovskiy, S. Influence of the Fibrous Structure on the Physical and Mechanical Characteristics of Insulating Slabs from Flax Noils / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // Construction Science : Scientific Journal of Riga Technical University. – 2017. – Vol. 20. – P. 10–16.
5. Romanovskiy, S Noils of flax fiber as a aggregate for heat-insulating plates / S. Romanovskiy, N. Davydenko // European and dimension in research : Electronic collected materials of IX junior researchers conference, 26–27 april, 2017. – P. 101–103.
6. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия : ТУ ВУ 391129716.001-2015. – Введ. 27.07.2015. – Ореховск, 2015. – 10 с.
7. Советников, Д.О. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга / Д.О. Советников, Д.О. Семашкина, Д.В. Баранова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12 (51). – С. 7–19.
8. Красимова, С.С. Обзор биопозитивных строительных материалов, применяемых при строительстве экоддома / С.С. Красимова, В.А. Малышева, Д.Н. Рожкова // Masters journal. – 2014. – С. 363–369.
9. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний : ГОСТ 17177-94. – Введ. 22.08.1995. – Минск : Минстройархитектуры, 1996. – 56 с.
10. Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме : СТБ 1618-2006. – Введ. 24.03.2006. – Минск : Минстройархитектуры. – 2006. – 9 с.
11. Давыденко, Н.В. Повышение водостойкости жидкого стекла, применяемого в качестве вяжущего при производстве теплоизоляционных костросоломенных плит / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 71–75.
12. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 328 с.

Поступила 21.12.2018

**DEGREE OF INFLUENCE OF FACTORS ON BASIC PHYSICAL
AND MECHANICAL INDICATORS
OF THERMAL INSULATING PLATES FROM FLAX NOILS**

S. ROMANOVSKIY, A. BAKATOVICH

The main factors that have the greatest influence on the physic-mechanical characteristics of heat insulating plates based on flax fiber noils have been established. The technology of obtaining samples to determine the physico-mechanical parameters of insulation. The proposed method for the study of water resistance of fibrous insulation materials. Implemented a three-factor experiment according to the plan of Box. According to the results of the experiment, polynomial models of molding pressure, thermal conductivity coefficient, compressive strength at 10% deformation, water resistance of heat-insulating materials from linen noil were obtained. To analyze the results obtained, single-factor graphs of the effect of changing variables on the material properties are plotted. The results of the studies indicate that the average density has the greatest impact on the molding pressure, thermal conductivity and compressive strength, and the amount of additive in the total binder consumption on the water resistance of the material.

Keywords: heat insulation plates, flax noil, liquid sodium glass, lime.

УДК 666.94:691.3

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ СИСТЕМЫ,
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЕ БАЗАЛЬТОВЫМ ФИБРОВЛОКНОМ****К.Ю. БЕЛОМЕСОВА***(Брестский государственный технический университет)*

Демонстрируются результаты экспериментально-теоретических исследований дисперсного армирования как наиболее эффективного способа получения цементных композитов с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Проведена сравнительная характеристика технических показателей наиболее распространенных видов армирующих волокон, с успехом применяемых в современном строительстве, а также базальтового волокна. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено преимущество последнего, заключающееся в его уникальных свойствах. Показано, что применение базальтовой фибры совместно с напрягающим цементом позволяет добиться не только роста прочностных характеристик цементных композитов, но также ведет к повышению их непроницаемости.

Ключевые слова: *напрягающий цемент, метакаолин, гипс, базальтовое фиброволокно, гидратация.*

Введение. Дисперсное армирование цементных композитов разного рода волокнами-фибрами – один из наиболее оптимальных способов получения высокофункциональных и высококачественных строительных материалов с повышенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. В качестве материалов для дисперсного армирования выступают различные виды металлических и неметаллических волокон минерального и органического происхождения, наиболее известными из которых являются: стальные, стеклянные, базальтовые, полипропиленовые и т.п.

Высокодисперсные волокнистые наполнители, применяемые в качестве армирующих компонентов, позволяют устранить основные недостатки традиционных бетонов – низкую прочность на растяжение и вязкость разрушения (трещиностойкость). В целом, среди множества материалов, применяемых для дисперсного армирования бетонов, на основании существующих, а также собственных исследований в данной области [1, с. 75] необходимо отдельно выделить *базальтовые волокна*.

Перспективность их использования объясняется многими факторами, главные из которых в большей степени основаны на природе самого волокна: базальтовое волокно является продуктом тепловой обработки горной породы типа базальт, обладающим высокими прочностными и физико-механическими характеристиками, свойственными исходной породе. Базальтовые волокна делятся на две большие группы: непрерывные (толщина элементарного волокна от 7 до 26 мкм) и дискретные волокна (толщина около 3...9 мкм), имеющие существенные различия, начиная от способа производства и заканчивая областью применения. Особый интерес при выборе армирующего компонента бетонных композитов вызывает разновидность непрерывного базальтового волокна – рубленое волокно (далее фиброволокно), получаемое методом производственной рубки из ровинга отрезков заданной длины, состоящих из множества параллельно уложенных элементарных волокон, собранных замасливателем во временные пучки (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Базальтовое фиброволокно в естественном состоянии (а)
в цементно-песчаной смеси (б)**

При соединении базальтовых фиброволокон с компонентами смеси в процессе перемешивания временные пучки распадаются на отдельные монофиламенты (рисунок 1, б), которые, в свою очередь, свободно и хаотично распределяются во всем объеме композита, вызывая так называемый эффект 3D-армирования. Таким образом, в цементном композите формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая, в свою очередь, эффективно противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при внешних силовых воздействиях. Вместе с тем необходимо отметить, что базальтовое фиброволокно имеет множество преимуществ перед другими армирующими волокнами (стальными, стеклянными, полипропиленовыми и т.п.), успешно применяемыми в современном строительстве (таблица 1).

Таблица 1. – Сравнительная характеристика различной фибры для бетона согласно [2]

Материал	Базальтовое фиброволокно	Полипропиленовая фибра	Стекловолоконно марки E или S	Стальная фибра
Прочность на растяжение, МПа	1900...3900	150...600	1500...3500	600...1500
Модуль упругости, ГПа	90...130	35	75	190
Коэффициент удлинения, %	3,2	20...150	4,5	3...4
Температура плавления, °С	1450	160	860	1550
Плотность, г/см ³	2,60	0,91	2,60	7,80

Преимущества данного вида волокон выражаются в уникальных свойствах базальтовых волокон, таких как: высокий уровень физико-механических и химических свойств; повышенная стойкость в агрессивных средах; долговечность; стабильность свойств при длительной эксплуатации в различных условиях; хорошая адгезия к различным связующим. Также базальтовые волокна обладают высокими конструктивными, теплозвукоизоляционными, диэлектрическими и другими свойствами, позволяющими широко использовать их в различных отраслях промышленности.

Однако, что касается дисперсного армирования цементных композитов базальтовым волокном, то у ученых нет единого мнения относительно способности данного волокна противостоять воздействиям среды гидратирующих цементов, являющейся агрессивной по отношению ко всем видам волокон, особенно минеральным. В настоящее время это является проблемой.

На современном этапе развития в области строительных материалов существует целый ряд исследований отечественных и зарубежных ученых, подтверждающих перспективность использования базальтового волокна для дисперсного армирования бетонов [2–4], но вместе с тем известны исследовательские работы, ставящие под сомнение способность базальтового волокна сопротивляться щелочным средам цементных систем [5].

Противоречивость результатов исследований связана со многими факторами, особенно с использованием различных методик при изучении данного вопроса, отличием в химических составах базальтовых волокон и т.п. Однако даже в условиях противоречивости данных о стойкости базальтовых волокон в цементных системах сегодня разрабатываются различные способы и методы защиты данных волокон от разрушения в щелочной среде.

По мнению авторов [2–5], один из эффективных способов защиты базальтового волокна в среде гидратирующих цементов – снижение щелочности (рН) данной среды, что может быть достигнуто как минимум двумя способами: 1) введением добавок различной природы и дисперсности; 2) выбором оптимального типа цемента. Из всех известных способов понижения щелочности среды гидратирующих цементов на сегодняшний момент наиболее широко применяемым является введение активной минеральной добавки – микрокремнезёма.

На основании данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, авторами [3–5] установлено, что введение в цементную систему микрокремнезема (в количестве 10%) приводит к значительному снижению рН среды (со значений $\approx 12,3$ до значений $\approx 11,96$). В свою очередь, это, по их мнению, ведет к созданию благоприятных условий для лучшей сохраняемости базальтового волокна. При этом необходимо понимать, что щелочная среда, свойственная бетону, вызванная присутствием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и характеризуемая показателями концентрации ионов водорода рН, достигающими значений 12...13, служит главным образом защитой стальной арматуры железобетона от коррозии. Многочисленными исследованиями доказано, что сталь подвержена коррозии уже при значениях рН от 5 до 10, однако при значениях рН, достигающих 10 и более, скорость коррозии быстро падает, а при значении рН около 14 она практически отсутствует. Таким образом, чем выше щелочность среды, тем выше ее защитные свойства по отношению к стальной арматуре.

Исходя из вышесказанного, встает вопрос о необходимости и целесообразности снижения уровня pH среды гидратирующего цемента. Что касается железобетона, то здесь ответ очевиден: снижая щелочность бетона за счет введения микрокремнезема, мы сознательно создаем «благоприятные» условия для протекания процессов коррозии стальной арматуры, тем самым понижаем важнейшие характеристики, а именно прочность и долговечность конструкций из железобетона. Что касается введения микрокремнезема и, как следствие, снижения pH среды гидратирующих цементов по отношению к базальтовому волокну, то здесь также нет однозначного ответа. По мнению большинства исследователей, базальтовая фибра, являясь по своей природе продуктом обработки горной породы типа базальт, обладает высокими прочностными, физико-механическими характеристиками, а также повышенной стойкостью в агрессивных средах.

Таким образом, применение в качестве дисперсного армирования базальтового волокна выступает как эффективный способ повышения важнейших характеристик цементных бетонов.

Однако фиброармированные бетоны, несмотря на ряд преимуществ перед традиционными, обладают некоторыми недостатками, хотя и в меньшей степени, чем последние. Основным недостатком фиброармированных бетонов, по-прежнему остается наличие усадочных деформаций, развивающихся как во время гидратации цемента (наиболее активно), так и в процессе эксплуатации конструкции. В свою очередь, развитие усадочных деформаций, в частности аутогенной усадки, приводит к микротрещинообразованию композита и, как следствие, к потере несущей способности всей конструкции.

Один из возможных способов решения указанной проблемы – применение специальных вяжущих, в которых часть цемента заменяется композицией на основе алюминатных и сульфатсодержащих материалов. Такие цементы принято называть напрягающими, их расширение происходит в результате взаимодействия алюмо- и сульфатсодержащих фаз с повышенным образованием этtringита ($C_3A\bar{S}_3H_{32}$) [6, с. 102]. В качестве алюмосодержащего компонента представлен метакаолин (МТК), а в качестве сульфатного компонента – двуводный гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (гипсовый камень) как наиболее стабильный сульфатсодержащий продукт.

Экспериментальные исследования и их анализ. На основании вышеизложенного в целях изучения вопроса влияния напрягающего цемента, состоящего из портландцемента и расширяющейся добавки, представленной метакаолином и гипсом, на стойкость базальтового волокна в данной цементной среде проведен ряд экспериментальных исследований. Основным из исследований было определение pH среды гидратирующего напрягающего цемента. Для проведения постановочных исследований, касающихся определения концентрации ионов водорода pH, получены водные вытяжки цементного камня в соответствии с методикой, подробно описанной в СТБ 1168 [7].

В качестве контрольных образцов были заформованы образцы-кубы с длиной ребра 20 мм, всего заформовано четыре контрольных серии. Определение значений концентрации ионов водорода pH проводили на стационарном pH-метре «pH-211» производства HANNA Instruments.

Результаты исследования влияния компонентов напрягающего цемента на изменение pH цементной среды представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Изменение pH водной вытяжки цементной системы

Наименование серии	Состав	Значение pH среды	Температура исследуемой вытяжки, °С
Серия А	ПЦ	12,66	17,4
Серия А'	ПЦ + БФ (5%)	12,68	17,6
Серия В	НЦ	12,66	17,6
Серия В'	НЦ + БФ (5%)	12,68	17,7

ПЦ – портландцемент; НЦ – напрягающий цемент; БФ – базальтовое фиброволокно (в количестве 5% от массы вяжущего).

Из полученных данных следует, что напрягающий цемент, применяемый в качестве вяжущего вещества, практически не оказывает влияния на значения концентрации ионов водорода pH цементной среды, следовательно, среда гидратирующего напрягающего цемента по-прежнему остается щелочной, другими словами, агрессивной для минеральных волокон, по мнению некоторых авторов [5].

Однако то, что базальтовое волокно в среде гидратирующих цементов теряет свои прочностные и физико-механические характеристики, с большой уверенностью сказать нельзя, так как работы авторов [2–4], напротив, доказывают высокий уровень стойкости базальтового волокна в щелочной среде. Также необходимо отметить, что степень влияния щелочной среды на основные характеристики базальтового волокна во многом зависит от вида базальтового волокна (дискретное или непрерывное). Связано это в большей степени с поверхностью волокна. Дискретное волокно обладает развитой поверхностью и наличием нежелательных дефектов (пор и микротрещин) на поверхности самого волокна,

что способствует быстрому протеканию процессов адсорбции агрессивной среды и в результате ведет к снижению прочности волокна в целом, а в некоторых случаях даже к разрушению. При этом непрерывное волокно характеризуется более гладкой поверхностью, что видно на микрофотоснимке комплексной нити базальтового фиброволокна (рисунок 2), в меньшей степени обладающей наличием таких дефектов, как поры и микротрещины.

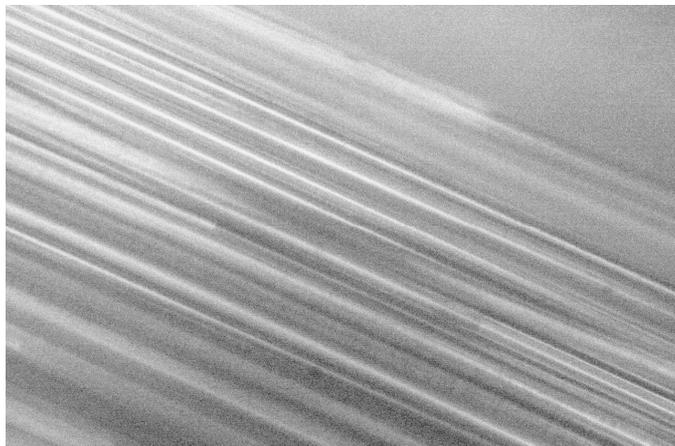


Рисунок 2. – Микроснимок комплексной нити (фиброволокно)

Что касается влияния базальтового волокна на прочностные характеристики цементных композитов, то значения прочности на растяжение при изгибе образцов серии В (без армирования) в возрасте 28 суток примерно на 50% меньше значения прочности образцов серии В' (армированных базальтовой фиброй). Следовательно, введение в смесь базальтовых волокон способствует увеличению прочности цементного композита за счет высокого сцепления волокна с модифицированной цементной матрицей и создания эффекта объемного микроармирования (3D-армирования). Также необходимо отметить, что при введении базальтовой фибры увеличивается вязкость смеси, что обусловлено расщеплением одного базальтового фиброволокна на множество мельчайших монофиламентов, которые обволакивают все компоненты смеси и образуют единую пластично-вязкую систему. Благодаря такому хаотичному расположению монофиламентов в цементной системе формируется пространственная микроармированная цементная матрица, которая, в свою очередь, эффективно противодействует сжимающим и растягивающим напряжениям, возникающим в бетоне при внешних силовых воздействиях.

Таким образом, анализ выполненных экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать следующие **выводы**:

- 1) комплекс проведенных исследований стойкости базальтовых волокон в водной вытяжке цементного камня, включающий микроскопический анализ и прямые испытания, свидетельствует о незначительном влиянии щелочной среды гидратирующего цемента, а именно напрягающего цемента на прочностные характеристики базальтового фиброволокна;
- 2) введение параллельно с расширяющимися компонентами напрягающего цемента базальтового фиброволокна позволяет не только предотвратить нежелательные усадочные деформации, но и создать совместное с расширяющейся цементной системой 3D-армирование, что собственно и приводит к получению композитов с высокими эксплуатационными характеристиками;
- 3) введение в состав цементных композитов базальтового фиброволокна позволяет увеличить показатели прочности как на ранних, так и на поздних стадиях твердения;
- 4) в свою очередь, получить четкие закономерности протекания процессов гидратации и формирования фазового состава цементного камня в присутствии активных минеральных добавок (микркремнезем, метакаолин и т.п.) не представляется возможным, поскольку система таких пуццоланов довольно сложная, формирование соединений в большей степени определяется условиями протекания гидратации, а также качеством исходного сырья и технологией изготовления данных минеральных добавок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беломесова, К.Ю. Применение базальтовой фибры в качестве армирующего компонента в цементно-песчаных композитах / К.Ю. Беломесова // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 74–77.

2. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф.Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.
3. Боровских, И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И.В. Боровских ; Казан. гос. архитектурно-строительный ун-т. – Казань, 2009. – 168 с.
4. Деревянко, В.Н. Стойкость базальтового волокна в различных средах / В.Н. Деревянко // Вісник ПДАБА : до 80-річчя Придніпр. держ. акад. будівн. та архіт. – 2010. – № 2. – С. 1–6.
5. Бабаев, В.Б. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе / В.Б. Бабаев // Вестн. Белгород. гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.
6. Павлова, И.П. Исследование влияния расширяющихся сульфоферритных и сульфоалюминатных добавок на прочностные показатели и собственные деформации цементных систем / И.П. Павлова, Т.В. Каленюк, К.Ю. Беломесова // Вестн. БрГТУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 1. – С. 123–127.
7. Бетоны. Метод контроля коррозионного состояния стальной арматуры в бетоне и защитных свойств бетона : СТБ 1168-99. – Введ. 21.07.1999. – Минск : Минстройархитектуры, 1999. – 20 с.

Поступила 21.12.2018

HIGHLY EFFICIENT BASALT FIBER-REINFORCED COMPOSITE SYSTEMS

K. BELAMESAVA

In present paper are presented experimental-theoretical researches of fiber reinforcing such as more effective method for high physical-mechanical and exploitation properties cement composite acceptance. Comparative characteristics of technical properties for more prevailing reinforced fiber which are successful applied in building, including basalt fiber, are carry out. Theoretical validated and experimental affirmed basalt fiber advantage, involving in uncial properties such as high level physical-mechanical and chemical characteristics, durability and so on. Use of basalt fiber, introduction of which in minimal amount due to disintegration on monofilament with great specific surface lead to three-dimension micro reinforced cement matrix formation, which are effective counteracted to compressive and tensile stresses, taking place in concrete on external force interactions. Basalt fiber insertion in expansive cementitious systems lead to partial restriction composite self strains and due to high adhesion with modified cement matrix tensile strength are increased. Applying of basalt fiber jointly with self-stressing cement allow to avoid not just only cement composite strength properties, but also increasing impermeability.

Keywords: self-stressing cement, metakaolin, gypsum, basalt fiber, cement hydration process.

УДК 691.322:691.27:66.063.62(476)

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ СУСПЕНЗИИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

канд. техн. наук, доц. **Н.Н. КАЛИНОВСКАЯ**
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
канд. техн. наук **Д.С. КОТОВ; Е.В. ЩЕРБИЦКАЯ**
(Институт БелНИИС, Минск)

Рассмотрено влияние химических добавок, микрокремнезема и суспензии микрокремнезема на физико-механические свойства затвердевшего бетона и подвижность бетонной смеси. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния содержания и вида различных пластификаторов, а также микрокремнезема на кинетику набора прочности на сжатие модифицированного бетона. Обоснована необходимость разработки отечественной суспензии микрокремнезема как наиболее технологичной формы его введения в бетонную смесь, позволяющей снизить себестоимость бетона в сравнении с импортными аналогами. Выполнены исследования по введению суспензии микрокремнезема на прочностные и технологические свойства бетона.

Ключевые слова: минеральные наполнители, микрокремнезем, суспензия микрокремнезема, фактор прочности, набор прочности, эффект пластификации.

Краткий обзор использования различного рода минеральных наполнителей при производстве бетона. Минеральные наполнители широко применяются производителями бетона во всем мире. Условно их можно разделить на *инертные* (доломит, гранитный отсев, молотый песок, известняк) и *активные* (микрокремнезем, зола уноса, молотый доменный шлак, метакралин, зола рисовой шелухи) наполнители природного и искусственного происхождения.

Традиционно минеральные наполнители используются для следующих целей: удешевления бетона за счет частичной замены цемента (обычно 30...80% от массы вяжущего в составе); изменения свойств бетона в нужном направлении (получение высокопрочных, коррозионностойких бетонов; уменьшение тепловыделения бетона в массивных конструкциях за счет замены части цемента на наполнитель и т.д.); применение техногенных минеральных наполнителей в бетоне позволяет утилизировать отходы металлургических и энергетических производств.

Краткая характеристика наиболее распространенных минеральных наполнителей приведена в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики наиболее распространенных активных наполнителей

Наполнитель	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	$S_{\text{уд}}, \text{м}^2/\text{кг}$	Насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Форма частиц	Дозировка, от массы цемента, %	Фактор прочности k
Микрокремнезем	> 90	> 20000	150...430	Сферическая	5...10	1,8...2
Зола уноса низкокальциевая (класс С)	> 85	250...400	540...860	Сферическая	15...40	0,8...1
Зола уноса высококальциевая (класс F)	> 55	300...400			15...25	0,5...0,7
Метакралин	> 90	> 18000	–	Пластинчатая	5...10	–
Доменный шлак	> 40	350...600	350...1000	Угловатая	30...65	0,9

Несмотря на подтвержденную во всем мире эффективность применения активных минеральных наполнителей, в Беларуси они применяются в незначительном количестве. Основная причина – нетехнологичность данного вида добавок, которые представляют собой пылящие, гигроскопичные, легко слеживающиеся, налипающие на технологическое оборудование и шнеки подачи цемента, склонные к комкованию материалы. Расход наполнителей может достигать в отдельных случаях до 200...250 кг на 1 м^3 бетона, поэтому для их хранения на бетонном заводе требуются дополнительные цементные силосы. Низкая насыпная плотность минеральных наполнителей (вплоть до $150 \text{ кг}/\text{м}^3$) увеличивает стоимость доставки: стандартная цистерна объемом 16 м^3 вмещает до 8...11 тонн уплотненного микрокремнезема (МКУ) и около 5...6 тонн неуплотненного МК.

Зачастую эффективность применения активных наполнителей оценивают с помощью фактора прочности k , характеризующего увеличение прочности бетона при замене некоторого количества цемента на такое же количество активного наполнителя [1]. Из таблицы 1 видно, что зола уноса и шлаки в зависимости от их вида и введенного количества могут способствовать удешевлению бетона практически без потери прочности (в зависимости от их типа, например, зола-унос класса С), в то время как микрокремнезем способствует значительному увеличению его прочности в пределах $k = 1,8...2,0$. Этим поло-

жительное влияние микрокремнезема на бетон не ограничивается. С начала 1980-х годов микрокремнезем служит неотъемлемым компонентом бетонов высокопрочных, коррозионостойких, морозостойких, а также бетонов с повышенными требованиями по высокообразованию.

Размер частиц микрокремнезема, в 100 раз меньших, чем цемент, в сочетании с высоким содержанием двуокиси кремния создает мощный пуццолановый эффект. При таком размере частиц 40 кг микрокремнезема, составляющие среднюю дозировку, будут иметь площадь поверхности около одного квадратного километра, вступающей в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемого по мере гидратации цемента. Это означает, что микрокремнезем оказывает более ранний эффект, чем другие пуццолановые добавки. Наблюдается отчетливое изменение пористой структуры бетона с содержанием микрокремнезема в сторону уменьшения числа капиллярных пор и увеличения числа более мелких гелевых пор. По количеству содержания химически связанной воды и степени гидратации портландцемента добавка МК резко ускоряет процесс гидратации на ранней стадии твердения до 7 суток. При В/Ц = const цементный камень с МК в возрасте 7 суток эквивалентен степени гидратации цемента без добавки в возрасте 28 суток. В этом же соответствии изменяется прочность бетона в два раза как при нормально-влажностном твердении, так и при тепловлажностном с температурой 60 °С [2].

Повышение гидратации силиката кальция и снижение числа капиллярных пор обеспечивают две основные характеристики бетона с содержанием микрокремнезема – повышенную прочность и повышенную непроницаемость. Двойной эффект придает бетону большую устойчивость к физическим (истирание, эрозия и ударное разрушение) и химическим воздействиям (проникновение воды, сульфатов, хлоридов, органических веществ и кислот).

Опыт других стран, в частности Норвегии и Швеции, по исследованию бетонных конструкций в возрасте до 12 лет показал, что высококачественные бетоны с содержанием МК обладают не меньшей устойчивостью к карбонизации, чем бетоны такой же прочности на обычном портландцементе, и гораздо лучше предотвращают проникновение хлоридов из морской воды. Таким образом, можно констатировать, что при условии надлежащего выдерживания способность бетона с МК защищать стальную арматуру не будет существенно отличаться в сравнении с бетоном той же прочности на обычном портландцементе.

Предпосылки для разработки отечественной суспензии микрокремнезема. Работать с микрокремнеземом сложно, так как он представляет собой тонкодисперсный пылящий материал. Поэтому существует мировая практика ввода его в бетон в смеси с водой, т.е. в виде суспензии. Смесь воды и микрокремнезема неустойчива, склонна к быстрому оседанию, вследствие этого в нее вводят стабилизатор, который стабилизирует частички микрокремнезема в воде и препятствует загустеванию суспензии при хранении.

Значительное количество иностранных и русскоязычных публикаций содержат данные об использовании органических и неорганических кислот, спиртов в качестве стабилизаторов для суспензии микрокремнезема. Однако, как считает С.С. Каприелов и другие ученые, приготовленные указанными способами суспензии имеют недостатки: малые сроки хранения, пониженные значения рН и, как следствие, невозможность транспортировать кремнезем в металлической таре, запах аммиака в бетонной смеси, увеличение вязкости со временем и т.д. [3].

Таким образом теоретически существует много способов получения суспензии кремнезема, но в реальности как на белорусском, так и на российском рынке до недавнего времени присутствовали суспензии микрокремнезема ведущих европейских фирм, однако и они не нашли широкого применения из-за чрезмерно высокой цены – около 800 евро за тонну 40%-ной суспензии микрокремнезема.

В 2015 году белорусские специалисты разработали и предложили на рынке суспензию микрокремнезема под торговым названием «Полипласт МК», выпускаемую по ТУ ВУ 190679156.005-2015 ООО «ПолипластХИМ». Продукт в несколько раз дешевле, чем европейские аналоги, представляет собой устойчивую (в течение не менее 3-х месяцев) суспензию аморфного микрокремнезема (рисунок 1).



Рисунок 1. – Общий вид суспензии микрокремнезема (а) порошкообразное состояние (б)

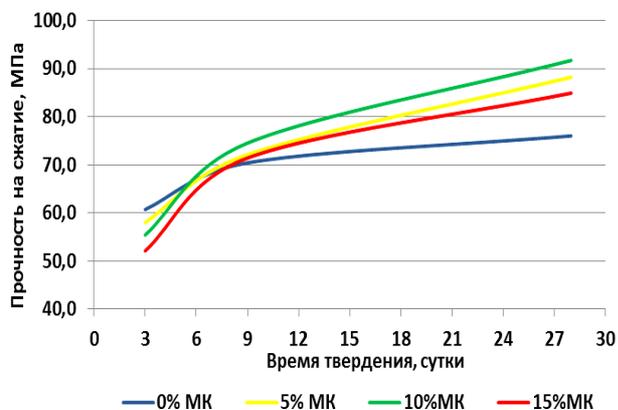
Согласно полученным данным, наиболее предпочтительной концентрацией суспензии микрокремнезема является концентрация 40 и 50%. Характеристики суспензии приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Характеристики суспензии микрокремнезема «Полипласт МК»

Показатель	ТНПА на метод испытаний	Фактически полученное значение
Внешний вид добавки	СТБ 1112-98 п. 9.2	Однородная жидкость темно-серого цвета
Массовая доля сухого вещества, %	СТБ 1112-98 п. 9.3	50
Плотность суспензии, кг/м ³	СТБ 1112-98 п. 9.4	1400
Водородный показатель (рН) раствора 5%-ной концентрации	СТБ 1112-98 п. 9.5	9,0
Содержание ионов хлора	СТБ 1112-98 п. 9.7	менее 0,1
Индекс активности (увеличение прочности цементно-песчаного раствора в возрасте 28 суток), %	СТБ EN 13263-1-2012	117

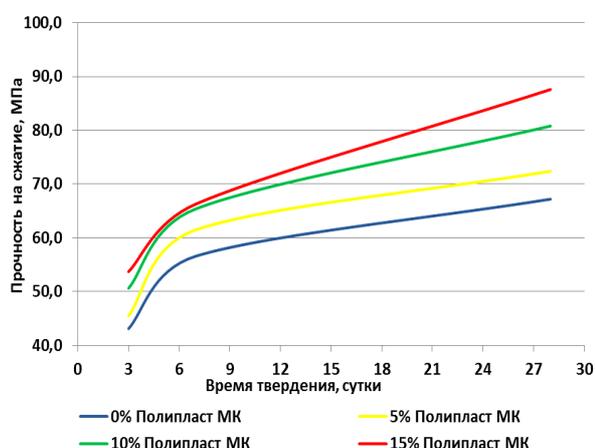
Влияние суспензии микрокремнезема «Полипласт МК» на физико-механические свойства конструкционного и дорожного бетона. Как уже отмечалось выше, влияние микрокремнезема на свойства бетонной смеси и бетона исследовалось научным сообществом как минимум последние 30 лет. В данной работе приводятся лишь результаты базовых испытаний бетонной смеси и бетона с суспензией микрокремнезема. Полипласт МК может вводиться по 2 схемам: дополнительно к цементу в качестве замены части цемента. На рисунках 2 и 3 показано изменение прочности бетона при введении суспензии МК.

При проведении испытаний не ставилась задача получения высокопрочных бетонов, поэтому изготавливались бетоны традиционных составов с применением рядовых материалов. Во всех экспериментах использовались: цемент ПЦ 500ДОН ОАО «Белорусский цементный завод»; минералогический состав C_3S 60,81%, C_2S 17,19%, C_3A ,87%, C_4AF 11,22% (данные производителя), предел прочности в возрасте 28 суток 50,6 МПа, $K_{ит} = 27\%$; песок 1 класса, $M_k = 2,3$ ОАО «Нерудпром» к/р «Крапужино»; щебень гранитный 5...20 IV группы производства РУПП «Гранит» (Беларусь, г. Микашевичи); поликарбоксилатный суперпластификатор «Реламикс ПК» производства ОАО «ПолипластХИМ» ТУ ВУ 190679156.002-2013.



Цемент 450 кг, песок/щебень = 0,9 (по массе), В/Вяз = 0,3, расход добавки Реламикс ПК подбирался для достижения удобоукладываемости бетонной смеси, соответствующей РК = 50...55 см

Рисунок 2. – Влияние Полипласт МК на прочность бетона при введении Полипласт МК (МК вводился дополнительно к цементу)

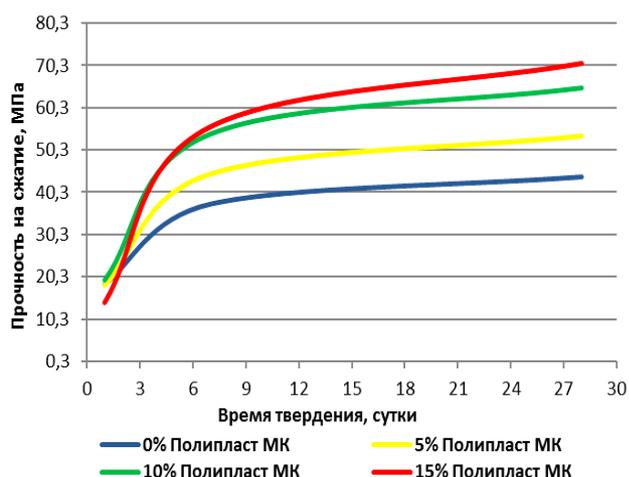


Цемент 450 кг, песок/щебень = 0,9 (по массе), В/Вяз = 0,3, расход добавки Реламикс ПК подбирался для достижения удобоукладываемости бетонной смеси, соответствующей РК = 50...55 см

Рисунок 3. – Влияние Полипласт МК на прочность бетона при введении Полипласт МК в качестве замены части цемента

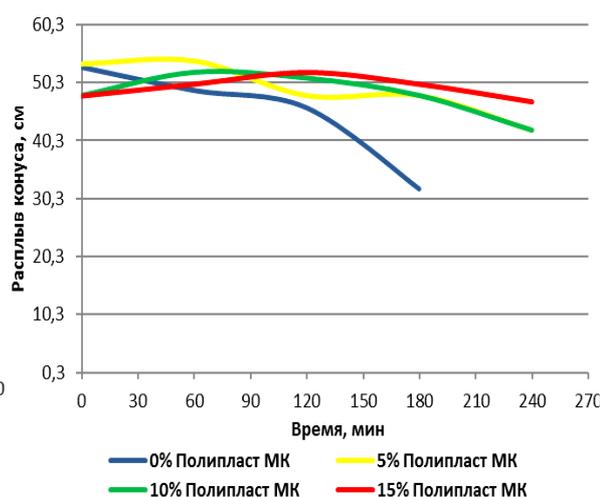
Как показали полученные результаты, прирост прочности для Полипласт МК значителен и составляет до 30%. Однако при расчете экономической эффективности применения микрокремнезема, в том числе в виде суспензии, следует учитывать повышенную дозировку пластификаторов, обусловленную высокой удельной поверхностью микрокремнезема.

Влияние Полипласт МК на технологические и физико-механические свойства дорожной бетонной смеси и бетона показано на рисунках 4 и 5. Испытания проводились на дорожном бетоне с нормируемым уровнем содержания вовлеченного воздуха в пределах 5...7%. В качестве воздухововлекающей использовалась добавка Полипласт Вибро ТУ ВУ 190679156.001-2010.



Цемент 450 кг, песок/щебень = 0,9 (по массе), В/Вяз = 0,3, расход добавки Реламикс ПК подбирался для достижения одинаковой удобоукладываемости бетонной смеси. Содержание воздуха в бетонной смеси 5...7%

Рисунок 4. – Влияние Полипласт МК на прочность бетона:
МК вводился дополнительно к цементу



Цемент 450 кг, песок/щебень = 0,9 (по массе), В/Вяз = 0,3, расход добавки Реламикс ПК подбирался для достижения одинаковой удобоукладываемости бетонной смеси. Содержание воздуха в бетонной смеси 5...7%

Рисунок 5. – Влияние Полипласт МК на сохраняемость бетонной смеси:
МК вводился дополнительно к цементу

Как видно из графиков, введение микрокремнезема в бетон с воздухововлекающими добавками значительно повышает набор прочности как в ранние сроки твердения, так и в возрасте 28 суток. В частности, при введении 15% суспензии проектная прочность возросла практически в 2 раза, в этом же случае бетонная смесь показала и менее выраженную потерю подвижности в сравнении с бездобавочным вариантом.

Выбор пластифицирующей добавки при работе с микрокремнеземом. Проектирование составов бетона с микрокремнеземом имеет свои характерные особенности, связанные с выбором типа и дозировки пластификатора. Введение микрокремнезема в бетон значительно повышает вязкость бетонной смеси и, следовательно, требуется введение дополнительных дозировок суперпластификатора.

Однако было бы ошибочным рассматривать микрокремнезем как инертный наполнитель, чья повышенное потребление пластификатора связано только с развитой удельной поверхностью. Установлено [4], что лишь определенные типы пластификаторов являются эффективными разжижителями для микрокремнезема. Данный эффект продемонстрирован на рисунке 5.

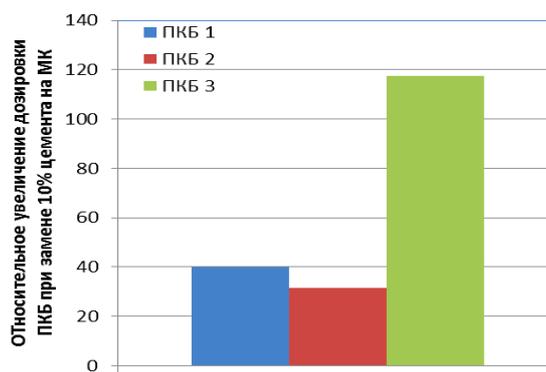
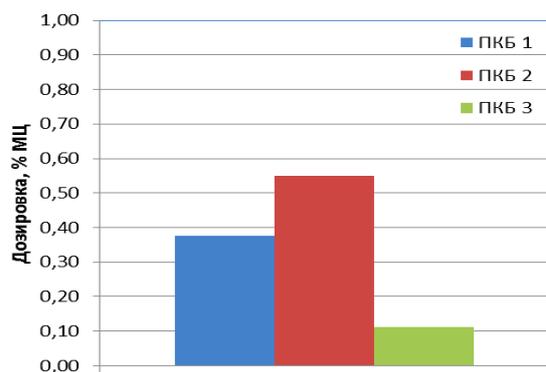


Рисунок 6. – Дозировка поликарбоксилатного пластификатора, требуемая для достижения равного расплава конуса на цементном тесте и на смеси цемента и микрокремнезема

На рисунке 6 показаны дозировки различных коммерчески доступных поликарбоксилатных пластификаторов для разжижения микрокремнезема и цемента. В испытании применялся цемент ПЦ 500ДОН ОАО «Белорусский цементный завод» и микрокремнезем уплотненный МКУ-85 производства.

Поликарбоксилатные основы (ПКБ 1, 2, 3) широко распространены на рынке продаж. Приготовление цементного теста производилось в следующем порядке: вода с добавками перемешивались в течение 5 с,

затем цемент либо смесь цемента и микрокремнезема. Дозировка пластификатора подбиралась для достижения расплыва конуса по ГОСТ 310.4, равного 21...22 см.

Таким образом, эффективные разжижители для цемента не являются таковыми для микрокремнезема и наоборот. Смешанные вяжущие требуют смешанных суперпластификаторов. И если для бетонов прочностью до 70...80 МПа еще обосновано применение традиционных монокомпонентных поликарбоксилатных пластификаторов, в которых в качестве мономеров основной цепи используются (мет) акриловая кислота, то при изготовлении бетонов большей прочности наилучшим выбором будет смесь различных типов поликарбоксилатов. Это позволит минимизировать дозировку суперпластификатора и исключить побочные эффекты от действия пластификатора, такие как повышенное воздухововлечение при увеличении дозировок выше оптимальных, замедление набора прочности, а также уменьшить стоимость бетона.

Среди практического опыта применения суспензии микрокремнезема Полипласт ПК можно отметить производство самоуплотняющегося бетона при возведении фундамента турбоагрегата Белорусской АЭС, а также монолитной плиты постамента «Коксовые барабаны» на объекте «Строительство установки замедленного коксования нефтяных остатков».

Заключение. Представлены результаты обобщения различных данных по применению минеральных наполнителей и пластифицирующих добавок, позволяющие сделать вывод о перспективности их использования и конкурентоспособности.

Обоснована наибольшая эффективность применения микрокремнезема как минерального наполнителя, повышающего практически все физико-механические свойства бетона.

Представлены данные по разработке суспензии микрокремнезема отечественного производства, позволившей устранить проблему дозирования сухих компонентов, комкования, налипания на технологическое оборудование, а также снизить итоговую стоимость бетона в сравнении с суспензиями иностранного производства.

Результаты исследований прочности на сжатие бетона 1...28 суток, модифицированного химическим пластификатором и суспензией микрокремнезема, показали значительный прирост (до 2-х раз) в сравнении с бездобавочным составом.

Данные исследования воздействия суспензии на сохранение подвижности бетонной смеси также показали ее благоприятное влияние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Храпко, М. Химические добавки в современных бетонных технологиях. Минеральные добавки в современных бетонных технологиях / М. Храпко // Материалы конференции ICCX 2014 года.
2. Холин, С. Применение микрокремнезема на бетонных производствах [Электронный ресурс] / С. Холин. – Режим доступа: <http://library.stroit.ru/articles/kremzem/index.html>.
3. Каприелов, С.С. Новый метод производства текучих концентрированных суспензий из микрокремнезема [Электронный ресурс] / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд ; НИИЖБ. – Режим доступа: http://www.masterbeton-mb.ru/science/#scientific_publications.
4. Plank, J. Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compability with Silica Fume / J. Plank // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2009. – № 7.

Поступила 11.06.2018

APPLICATION OF MICROSILICA SUSPENSION IN BELARUS

N. KALINOUSKAYA, D. KOTOV, A. SHCHARBITSKAYA

The influence of chemical admixtures, silica fume and silica fume suspension on properties of fresh and hard concrete is investigated in this work. Effects of different dosages and different types (superplasticizer and air entraining) of chemical admixtures and silica fume on workability, the loss of workability and compressive strength were investigated. It is shown that effective plasticizers for cement are not such for silica fume and vice versa. The necessity of the development of silica fume suspension in the Republic of Belarus is shown, as the most convenient to use form, which allows to reduce the cost of concrete in comparison with import analogues.

Keywords: mineral fillers, silica fume, silica fume suspension, compressive strength, plasticization.

УДК 666.3-1-12-127

СТРУКТУРА ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

д-р техн. наук, доц. С.М. АЗАРОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Анализируется структура фильтровального гранулированного материала на основе кварцевого песка. Показано, что при температуре спекания 800 °С происходит изменение механизма контактообразования между частицами кварцевого песка в грануле. При нагреве жидкая фаза появляется при температуре 795 °С, а при нагреве до 850 °С образуется полностью жидкий расплав. Образовавшаяся жидкая фаза обволакивает зерна кварца, залечивает появившиеся ранее трещины и при последующем охлаждении создает прочность гранулированного материала. На примере фильтрации промывной воды, полученной после регенерации экспериментальной установки обезжелезивания, дана оценка эффективности задерживания примесей исследуемым материалом.

Ключевые слова: промывная вода, фильтрация, фильтровальный материал, кварцевый песок, пористые гранулы, шихта, пластификатор, порообразователь.

Введение. При эксплуатации систем водоочистки возникают ситуации, требующие очистки воды, используемой для регенерации систем. Применяемые на сегодняшний день фильтрующие материалы характеризуются значительным гидравлическим сопротивлением и большим удельным весом, что приводит к большим энергетическим и эксплуатационным затратам. Следовательно, создание гранул с меньшим удельным весом и гидравлическим сопротивлением, используемых в качестве фильтрующих загрузок при очистке промывных вод, является актуальной задачей [1].

Цель данной работы – исследование структуры и свойств гранул на основе кварцевого песка.

Материалы и методики испытаний. Гранулы созданы на основе кварцевого песка марки ВС-020-В. Формирование гранул производили в грануляторе марки ОГМ-1,5; спекание – в лабораторной печи SNOL 7,2/1100 в воздушной среде при 850 °С в течение 3 ч. Вид гранул представлен на рисунке 1.

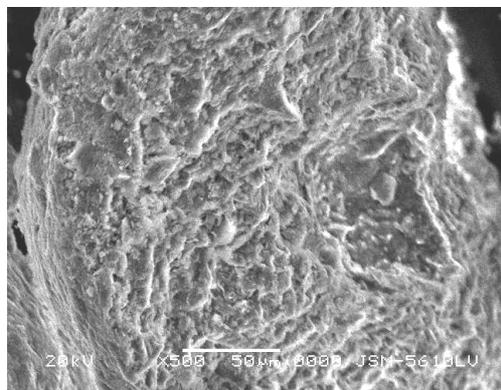


Рисунок 1. – Вид фильтровального гранулированного материала

В состав шихты кроме кварцевого песка входили следующие компоненты:

- пластификатор (сырье глинистое ТР 37328907-1.01-00);
- порообразователь ТУ РБ 00959441.005;
- неионогенный ПАВ (фрилан Б ТУ РБ 37430824.002-97).

Структуру материалов исследовали методами электронной микроскопии (микроскоп JEOL-5610LS).

Сравнительную оценку прочности керамических материалов на сжатие осуществляли по величине давления, разрушающего целостность образца в процессе испытания. Пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания – по увеличению массы образца при пропитке водой – и рассчитывали по следующей формуле:

$$P = (m_2 - m_1) \cdot 100 / V, \quad (1)$$

где P – пористость, %; m_1 – масса сухого образца, г; m_2 – масса образца после пропитки водой, г; V – объем образца, см³.

Качество очистки проверяли на экспериментальном модуле, на вход которого подавали промывную воду после регенерации экспериментальной станции водоподготовки. В ходе эксперимента изменяли скорость фильтрации промывной воды и скорость регенерации экспериментального модуля, одновременно контролируя концентрацию железа на его входе и выходе.

Экспериментальные результаты. Оптимизация состава шихты проводилась путем варьирования количества компонентов, наиболее значимо влияющих на формирование структуры и свойств исследуемых пористых материалов – пластификатора и порообразователя. Каждая из серий содержала не менее семи образцов. В таблице 1 представлены свойства экспериментальных образцов в зависимости от содержания пластификатора и порообразователя в исходной шихте, в соответствии с которыми прочность и пористость исследуемых материалов существенно зависят от содержания порообразователя – увеличение его количества в 2,1 раза приводит к росту пористости на 51,7%, при этом потеря прочности составляет 61,7%. Так как порообразователь и ПАВ полностью выгорают на ранней стадии процесса спекания (до 600 °С), то они не взаимодействуют с остальными компонентами шихты.

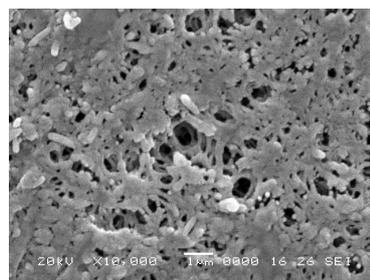
Таблица 1. – Свойства экспериментальных образцов из шихты разного состава

Серия	Содержание компонентов в шихте, г		Свойства образцов	
	пластификатор	порообразователь	пористость, %	прочность, МПа
1	4,5	6	33,5 (30,7...35,7)	13,1 (9,4...18,9)
2	5,5	6	32,1 (31,8...32,6)	21,6 (16,2...27,0)
3	6,5	6	36,9 (35,9...38,2)	34,4 (27,0...39,2)
4	7,5	6	24,3 (23,2...25,5)	30,3 (24,3...33,8)
5	6	4	23,2 (22,6...23,9)	39,4 (33,8...47,2)
6	6	5,5	28,2 (27,0...30,0)	32,9 (27,0...40,5)
7	6	7	30,4 (29,6...31,5)	22,9 (16,2...27,0)
8	6	8,5	35,3 (32,9...36,7)	15,1 (10,8...20,2)

В отличие от порообразователя, глинистое сырье активно взаимодействует с частицами кварцевого песка, поэтому изменение его количества по-иному влияет на пористость и прочность получаемого материала. Очевидно, что увеличение количества глинистого сырья в смеси исходных компонентов приводит к снижению пористости, что способствует росту прочности, однако этого не происходит. Максимальную прочность имеют образцы серии 3 с содержанием глинистого сырья 6,5 г. Дальнейшее увеличение количества связки (7,5 г), несмотря на снижение пористости образцов данной серии, не позволяет увеличить их прочность. На рисунке 2 представлена структура исследуемых фильтровальных материалов. Характер излома (рисунок 2, б) свидетельствует о наличии закрытой пористости образцов.



а



б

а – включения с повышенной концентрацией глинистого сырья на поверхности; б – излом

Рисунок 2. – Электронно-микроскопическое изображение структуры гранулированного фильтровального материала

Как указано в [2], при спекании шихты на основе кварцевого песка с добавлением глинистого сырья наблюдается несколько температурных диапазонов, ответственных за свойства получаемых материалов. В интервале температур 90...250 °С из сформованной смеси удаляется влага. Прочность смеси после удаления влаги значительно превышает прочность сырых образцов, что связано с достаточно высокими когезионными свойствами глинистого сырья. Достигнутая прочность после сушки позволяет производить рассев гранулированных материалов.

При 250...650 °С выгорают органические составляющие шихты (ПАВ и порообразователь). Термораспад органических веществ сопровождается потерей массы до 20...35% мас. и является начальным этапом формирования пор. Материал гранул при этих температурах представляет собой каркас, образованный кремнеземом (частицами кварца) и глинистым сырьем, в порах которого находится остаток выгорающего компонента. Углеродная часть выгорающего компонента в последующем способствует интенсификации процессов спекания при повышении температуры.

При температуре около 800 °С происходит изменение механизма контактообразования между частицами кварцевого песка в грануле. При нагреве жидкая фаза начинает появляться при температуре 795 °С, а при нагреве до 850 °С образуется полностью жидкий расплав. Образовавшаяся жидкая фаза обволакивает зерна кварца, залечивает появившиеся ранее трещины и при последующем охлаждении создает прочность пористого материала. На рисунке 2, б представлен фотоснимок излома, из которого следует, что в процессе структурообразования образуется закрытая пористость, уменьшающая насыпную массу гранул. В структуре гранулы частицы кварца организуют каркасную структуру, в которой неизбежно происходит образование микротрещин при высокотемпературном изменении сингонии кристаллической решетки SiO₂. Поэтому активирующие добавки карбонатов глинистого сырья в сочетании с жидкой фазой способны создавать условия, препятствующие лавинообразному процессу трещинообразования.

В таблице 2 приведены характеристики фильтровального гранулированного материала на основе кварцевого песка в сравнении с известными загрузками [3].

Таблица 2. – Характеристики фильтрующих материалов

Наименование характеристик	Birm	Greensand	Гидроантрацит	Песок	Гранулированный материал
Насыпная масса (г/см ³)	0,6...0,7	1,4	0,7...0,8	1,4...1,47	0,8...0,85
Плотность гранул (г/см ³)	2	2,4...2,9	1,65	2,65...2,75	1,45...1,65
Размер гранул (мм)	0,42...2	0,25...1,2	0,6...1,41	0,3...5	0,5...3

Из представленных в таблице 2 характеристик видно, что разработанный гранулированный материал имеет насыпную массу и плотность на уровне таких материалов, как Birm и гидроантрацит.

Экспериментальная партия гранул для очистки промывной воды после регенерации экспериментальной установки обезжелезивания изготовлена из материала серии 3 (см. таблицу 1). Для определения сочетания скоростей фильтрации гранулами и скоростей промывки фильтровального материала обратным потоком, обеспечивающих максимальное качество очистки, испытания проводили по следующей методике. Экспериментальный модуль с гранулами работал в одном технологическом цикле с экспериментальной установкой обезжелезивания. Режимы фильтрации и промывки гранулированных материалов на основе кварцевого песка исследовались отдельно от экспериментальной установки очистки воды. В процессе испытаний контролировались следующие параметры: скорости потока (м/ч) при фильтрации и промывке гранул обратным током для регенерации; концентрация Fe³⁺ (мг/л) до и после фильтрации, а также в режиме регенерации обратным потоком. Гранулы промывались обратным потоком воды после окончания фильтроцикла. Эффективность очистки определялась по формуле:

$$\gamma = \frac{Fe_{вх} - Fe_{вых}}{Fe_{вх}}, \quad (2)$$

где γ – эффективность очистки, %; $Fe_{вх}$ – концентрация общего железа на воде в установку, мг/л; $Fe_{вых}$ – концентрация общего железа на выходе установки после фильтрации, мг/л.

Концентрация общего железа после регенерации экспериментальной установки составляла 200 мг/л.

Для оценки эффективности очистки от соотношения скоростей фильтрации и скорости регенерации гранул промывкой обратным током (определяемых рабочим давлением) использовали полиномиальный метод аппроксимации. В силу того, что неизвестен вид аппроксимирующей зависимости, в качестве эмпирической формулы был выбран алгебраический многочлен второго порядка:

$$F(x) = A_1x + A_2x^2 + B, \quad (3)$$

где $F(x)$ – интерполируемая функция; A_1 – коэффициент интерполяции; A_2 – коэффициент интерполяции; B – остаточный член.

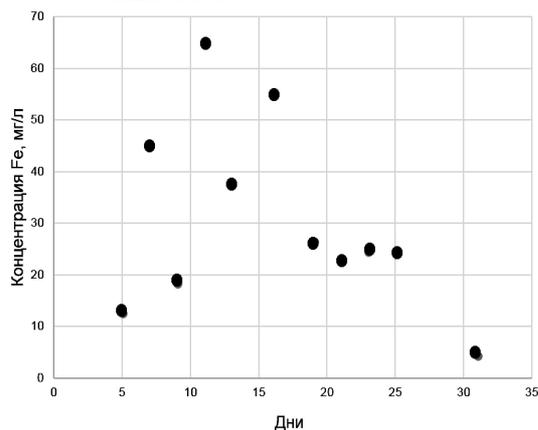


Рисунок 3. – Изменение концентрации железа во времени

При интерполировании функций использовали условие равенства значений интерполяционного полинома и данной функции в узлах интерполяции. Так как исходные данные получены в результате опытных измерений, то требуется лишь приближенное выполнение условий интерполяции. Это условие означает, что интерполирующая функция $F(x)$ проходит не точно через заданные точки, а в некоторой их окрестности.

Соотношения скоростей определяли для значений $\gamma = 0,3...0,5; 0,6...0,7; 0,8...0,9$.

Изменение концентрации железа во времени проиллюстрировано рисунком 3. Используя положения теории анализа функций, для выбранных значений γ были рассчитаны коэффициенты уравнений регрессии, значения которых представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Коэффициенты уравнений регрессии

γ	A_1	A_2	B
0,3...0,5	-0,42	0,037	3,12
0,6...0,7	14,7	-3	-12
0,8...0,9	-1,12	0,291	3,79

Кривые равных значений γ , рассчитанных по уравнениям регрессии в координатах «скорость фильтрации – $\ln(v_r)$ », представлены на рисунке 4.

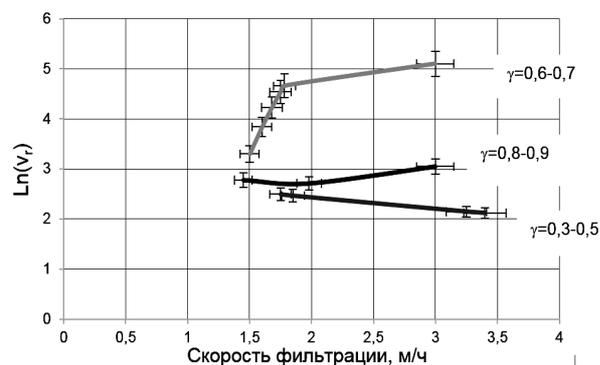


Рисунок 4. – Кривые равных значений γ , рассчитанных по уравнениям регрессии в координатах «скорость фильтрации – $\ln(v_r)$ »

зависят от содержания порообразователя и глинистого сырья. За счет наличия закрытой пористости насыпная плотность гранул составляет $0,8...0,85 \text{ г/см}^3$.

Заключение. На основании проведенных экспериментов по оценке эффективности очистки фильтровальным материалом – гранулами на основе кварцевого песка, разработанными автором, определено сочетание скоростей фильтрации и регенерации обратным потоком, обеспечивающее максимальное качество. Установлено, что в исследуемой области значений максимальная эффективность очистки достигается в диапазоне $0,1 < \sigma < 0,15$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курочкин, Е.Ю. Чистка загрязненных промывных вод станций обезжелезивания вакуум-фильтрованием [Электронный ресурс] : автореф. дис... канд. техн. наук : ВАК РФ 5.23.04 / Е.Ю. Курочкин. – Томск, 2003. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/247/2479337.html>. – Дата доступа: 05.08.2018.
2. Пористая алюмосиликатная керамика / С.М. Азаров [и др.]. – Минск : Ковчег, 2009. – 258 с.
3. Обзор фильтрующих загрузок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ochistkavodi.ru/_oborudovanie-vodoochistki-2/zagruzki-i-reagenty/filter-ag.html. – Дата доступа: 05.01.2019.

Поступила 17.12.2018

THE STRUCTURE OF GRANULAR MATERIAL ON THE BASIS OF QUARTZ SAND

S. AZARAU

The paper investigates possibilities of forming porous granules from silica sand for cleaning wash water. It is shown that when the concentration of iron in the wash water is up to $200 \text{ mg} / \text{dm}^3$, the combination of filtration rates through a load of porous granules based on quartz sand with a porosity of more than 50% and regeneration by reverse washing, the cleaning efficiency reaches 90%. The porous structure of the granules is formed due to the burning of the pore-forming agent during sintering of the samples in air at a temperature of $850 \text{ }^\circ\text{C}$. The resulting liquid phase envelops the quartz grains, heals the cracks that appeared earlier and, upon subsequent cooling, creates the strength of the granular material. For example, filtering of the rinsing water obtained after regeneration of the experimental installation of iron removal, evaluate the effectiveness of the retention of impurities of the investigated material.

Keywords: washing water, filtration, filter material, quartz sand, porous granules, charge, plasticizer, blowing agent.

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 004.023

БАЛАНС ГАЗА В СИСТЕМЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В РАМКАХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА

канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ;
Т.М. ГЛУХОВА; А.П. АНДРИЕВСКИЙ; А.Н. ЯНУШОНОК
(Полоцкий государственный университет)

В рамках разработанных авторами методов и алгоритмов оценки запаса газа по неизотермической стационарной модели транспортировки газа решается задача расчета его баланса. Поскольку мы имеем независимую оценку запаса газа, полученную с учетом реального распределения давлений и температур в газотранспортной системе и определяемую решением системы нелинейных уравнений неизотермической стационарной модели транспортировки газа с заданным значением нормы вектора невязки, то расчет запаса газа выступает инструментом верификации результата расчета баланса газа. Представлен анализ причин возможного появления разбалансов в системе и возможных способов корректировки баланса.

Ключевые слова: *транспортировка газа, баланс газа, алгоритм оценки его запаса, вектор невязки.*

В рамках расчета товарно-транспортной работы систем взаимосвязанных магистральных газопроводов, являющейся одной из составляющих, которые существенно влияют на формирование тарифа за газ, возникает проблема расчета баланса природного газа. Традиционно под балансом газа понимают систему показателей, характеризующих движение газа в пределах газотранспортного предприятия. В общем случае под балансом понимается равенство прихода и расхода газа [1; 2]. Важнейший показатель плана поставок природного газа – объем товарного газа $Q_{тов}$. Этот показатель означает количество газа, выбранное потребителями.

Объем товарного газа, выраженный из уравнения баланса газа согласно [2], представлен следующим выражением:

$$Q_{тов} = Q_{пост} + Q_{отб.пхг} - Q_{пни} - Q_n - Q_{зак.пхг} - Q_{зан},$$

где $Q_{пост}$ – поступление газа в газопровод с газовых промыслов и из других газотранспортных систем; $Q_{отб.пхг}$ – отбор газа из подземных хранилищ; $Q_{пни}$ – расход газа на производственно-технические нужды; Q_n – потери газа; $Q_{зак.пхг}$ – закачка газа в подземные хранилища; $Q_{зан}$ – расход газа на заполнение новых газопроводов.

Однако в более поздних работах обыгрывается ситуация, что в этом выражении, во-первых, не достаёт слагаемого, отражающего изменение запаса газа, во-вторых, в нем всегда будут присутствовать дисбалансы, связанные с нестационарными переходными процессами, в частности переходами с режима на режим [3]. В работах [3; 4] предложен алгоритм обнаружения признаков корректируемого измерения расхода газа путем статистического анализа случайных временных рядов суточного измерения прихода и распределения. Суточный дисбаланс D_i между приходом X_i и распределением Y_i в i -тые сутки измерений представлен в следующем виде:

$$D_i = X_i - Y_i; (i = 1, 2, \dots, n),$$

где n – число суток измерений временного ряда прихода и распределения.

Поскольку в газотранспортной системе существует изменение запаса газа

$$\alpha_i = Z_i - Z_{i-1},$$

где Z_i, Z_{i-1} – запас газа в газопроводе в i -тые и $(i-1)$ сутки измерений, связанный с колебаниями давления и температуры, то значение дисбаланса β_i между приходом и распределением имеет вид:

$$\beta_i = D_i - \alpha_i; (i = 1, 2, \dots, n).$$

Однако в [3] делается вывод, что среднее изменение запаса газа α равно

$$\bar{\alpha} = [Z_n - Z_1] / n \approx 0$$

и что для вычисления среднего значения дисбаланса при достаточно длинных временных рядах $n \rightarrow \infty$ необходимо учитывать среднюю разность

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i.$$

Такое допущение является искусственным и не может быть принятым, но сам подход к рассмотрению временного изменения дисбаланса как случайной величины представляется интересным. Данный подход используется в целом ряде современных методов прогнозирования дисбаланса, в частности в работах Ф.Г. Тухбатуллина и Д.С. Семейченкова из РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина [7–9].

С учетом высокой информационной загруженности диспетчерской службы, а также ограниченности времени для принятия управленческих решений имеется острая необходимость внедрения специальных программных комплексов системы поддержки принятия диспетчерских решений. В дочерних обществах ПАО «Газпром» уже внедрены такие программные комплексы, как «Астра», «ГазЭксперт», «ИУС-транспорт», «ИУС-ГАЗ», «Веста», «NormPro» и другие. Данные программные комплексы позволяют решить широкий спектр задач: прогнозирование поставок и потребления природного газа; расчет оптимальных режимов работы магистральных и распределительных газопроводов; расчет режимов работы газоперекачивающих агрегатов; сведения баланса газа по субъектам Российской Федерации; расчет запаса газа и т.д. Однако ни один из данных программных комплексов не позволяет на сегодняшний день провести анализ величины разбаланса природного газа [7].

Поскольку при формировании тарифов на газ ОАО «Газпром» применяет понятие средней стоимости транспортировки газа и, соответственно, средней товарно-транспортной работы (ТТР) по доставке газа потребителю для региона, то оценки средних и должны уточняться с учетом статистической оценки неизбежно возникающих дисбалансов.

В работе [5] нами выделены следующие особенности расчетной модели системы взаимосвязанных магистральных газопроводов:

- 1) топология сети меняется в реальном времени;
- 2) меняются множества входных и выходных узлов;
- 3) присутствуют пограничные узлы, характер которых определяется расчетным путем.

С учетом топологической изменчивости расчетной схемы, связанной с переходными процессами при изменении режимов, даже в пределах суток могут меняться маршруты доставки газа к конкретному потребителю.

Учитывая вышесказанное, можно дополнить перечень возможных причин возникновения в системе дисбалансов:

- 1) изменение топологии сети;
- 2) переходные нестационарные процессы (увеличение/уменьшение запасов газа на отдельных участках);
- 3) присутствие неустраняемых невязок, возникающих из-за ошибок в данных телеметрии;
- 4) *неучитываемые потери газа;*
- 5) *аварийные ситуации;*
- 6) *несанкционированный отбор газа;*
- 7) *технологические потери;*
- 8) *погрешность измерительных приборов.*

Поэтому статистическая оценка дисбаланса β в системе именно с учетом изменения запаса газа является корректным способом оценки допустимой погрешности при расчете баланса (откорректированного дисбаланса). Кроме этого, применяя расчет запаса газа, по результатам решения системы нелинейных уравнений неизотермической стационарной модели транспортировки газа устраняем зависимость величины разбаланса от среднемесячной температуры, фокусируясь на статистически значимых структурных особенностях газотранспортной системы. Необходимо также отметить, что часть величины разбаланса определяется погрешностью приборов учета расхода, датчиков давления и температуры. Данная погрешность оценки дисбаланса может быть определена в соответствии с формулами математической статистики, как

$$\Delta\beta = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \Delta x_i\right)^2}, \text{ или}$$

$$\Delta\beta = \sqrt{(\Delta\beta)_{x_1}^2 + (\Delta\beta)_{x_2}^2 + \dots + (\Delta\beta)_{x_i}^2},$$

где $\Delta\beta$ – абсолютная погрешность оценки баланса, определяемая погрешностями измерительной аппаратуры; Δx_i – абсолютная погрешность измерения расхода газа i -того потребителя.

Оценка погрешности вычисления дисбаланса, определяемая погрешностями измерительной аппаратуры, может быть определена методом математического моделирования и определения влияния отдельных параметров на функцию дисбаланса в целом. Данная составляющая является неустраняемой частью дисбаланса, которую при переходе к откорректированному дисбалансу также целесообразно исключить. Еще один, на наш взгляд, проблемный вопрос разработанного алгоритма расчета ТТР (принятой ОАО «Газпром» методики расчета [6]) – выбор единственного источника по принципу кратчайшего пути. Смешивание газа от разных источников при его транспортировке, которое вычисляем в разработанном нами программном комплексе расчета запаса газа, позволяет рассчитать ТТР как сумму ТТР от разных источников с учетом процента влияния каждого.

Таким образом, можно сформулировать следующие задачи для дальнейшего исследования:

- 1) изучение свойств случайной величины откорректированного дисбаланса, оценка непараметрических критериев согласия с наиболее подходящими для его описания теоретическими распределениями (смесями распределений);
- 2) формулировка допустимой погрешности откорректированного дисбаланса для конкретного газотранспортного предприятия;
- 3) оценка влияния погрешности средств измерения расходов, давлений, температур и иных параметров расчетной модели на величину оценки откорректированного дисбаланса;
- 4) сравнение методов расчета товарно-транспортной работы газотранспортного предприятия в контексте вопроса повышения точности расчета баланса газа при использовании метода откорректированного дисбаланса.

Заключение. В результате проведенного исследования *предложен метод оценки откорректированного дисбаланса газа* на основе независимой оценки изменения запаса газа в системе взаимосвязанных магистральных газопроводов по результатам решения системы нелинейных уравнений неизоэнтальной стационарной модели транспортировки газа; *систематизированы возможные причины возникновения дисбалансов в системе; сделан вывод о возможности статистической оценки величины дисбалансов* с целью определения допустимых пределов величины дисбаланса при условии учета расчетного значения изменения баланса газа, определяемого на основании реальной гидравлической и температурной обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перчик, А.И. Краткий словарь-справочник по экономике нефтегазодобывающей промышленности / А.И. Перчик. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Недра, 1976. – 208 с.
2. Организация, планирование и управление на предприятиях транспорта и хранения нефти и газа : учебник для вузов / А.Д. Бренц [и др.]. – М. : Недра, 1980. – 360 с.
3. Андришин, М.П. Динамика показателей статистической отчетности дисбаланса газа [Электронный ресурс] / М.П. Андришин, Е.А. Игуменцев // Метрология. – 2014. – С. 427–430. – Режим доступа: http://metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2014/pages/08/4.pdf.
4. Андришин, М.П. Моделирование и расчет дисбаланса газа между приходом и распределением / М.П. Андришин, Е.А. Игуменцев, Е.А. Прокопенко // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. – Донецк, 2010. – С. 10–14.
5. Алгоритм расчета товарно-транспортной работы магистрального газопровода в рамках неизоэнтальной стационарной модели транспортировки газа / Д.О. Глухов [и др.] / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 147–151.
6. Методика оценки энергоэффективности газотранспортных объектов и систем : СТО Газпром 2-3.5-113-2007.
7. Тухбатуллин, Ф.Г. О причинах разбаланса природного газа в системе газораспределения и методах прогнозирования его величины / Ф.Г. Тухбатуллин, Д.С. Семейченков // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2017. – № 6. – С. 14–20.
8. Тухбатуллин, Ф.Г. Прогнозирование величины разбаланса природного газа / Ф.Г. Тухбатуллин, Д.С. Семейченков, Т.Ф. Тухбатуллин // Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ. – 2017. – № 3 (288). – С. 63–69.
9. Тухбатуллин, Ф.Г. Статистические методы анализа причин разбаланса природного газа и прогнозирования его величины в системе газораспределения [Электронный ресурс] / Ф.Г. Тухбатуллин, Д.С. Семейченков // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2017. – № 2. – С. 10–15.

Поступила 17.12.2018

THE GAS BALANCE IN THE SYSTEM OF INTERCONNECTED GAS PIPELINES UNDER NON-ISOTHERMAL STEADY STATE MODEL OF GAS TRANSPORTATION

D. GLUKHOV, T. GLUKHOVA, A. ANDRIEVSKY, A. YANUSHONOK

Within the framework of the methods and algorithms for estimating gas reserves developed by the authors according to the non-isothermal stationary model of gas transportation, the problem of calculating the balance is solved. Since we have an independent estimate of the gas reserve obtained taking into account the real distribution of pressures and temperatures in the gas transportation system and determined by solving a system of nonlinear equations of a non-isothermal stationary model of gas transportation with a given value of the residual vector norm, the gas margin calculation serves as a tool for verifying the gas balance calculation result. The paper analyzes the reasons for the possible occurrence of unbalances in the system and possible ways to adjust the balance.

Keywords: *gas transportation, gas balancing, the algorithm for estimating its reserve, the vector of residuals.*

УДК 696.4:697.341

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ЗАВЫШЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ГРЕЮЩЕГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТАХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

А.М. НИЯКОВСКИЙ, Ф.И. МОСКАЛЁНОК
(Полоцкий государственный университет);
А.А. НИЯКОВСКИЙ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

На основании анализа фактических данных о работе блоков горячего водоснабжения в действующих индивидуальных тепловых пунктах жилых зданий, оборудованных пластинчатыми водонагревателями горячего водоснабжения, установлено, что несоответствие мощности водоподогревателей фактической тепловой нагрузке, занижение температуры греющего теплоносителя на входе водоподогревателя и высокая доля циркуляционного расхода в общем расходе нагреваемой воды ведут в неотопительный период при малых величинах водоразбора к росту температуры теплоносителя в обратной магистрали тепловой сети.

Ключевые слова: пластинчатые теплообменники, горячее водоснабжение, индивидуальные тепловые пункты, температурный график.

Введение. Температура теплоносителя, возвращаемого потребителями источнику теплоснабжения, должна соответствовать значениям, обеспечивающим необходимую эффективность использования первичного топлива при выработке энергии. В случае теплоснабжения от когенерационных источников повышение температуры воды в обратной магистрали ведёт к снижению объёма комбинированной выработки электрической энергии на тепловом потреблении, а при теплоснабжении от котельных – к росту температуры уходящих дымовых газов и, как следствие, к ухудшению КПД котельных агрегатов.

В результате натурных наблюдений за реальными эксплуатируемыми объектами удалось установить, что в ряде случаев после произведённой в ходе модернизации замены устаревших кожухотрубчатых теплообменников на пластинчатые теплообменники (ПТО), имеет место увеличение температуры греющего теплоносителя на выходе из индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) жилых зданий в неотопительный период сверх значений, предусмотренных температурным графиком.

Цель настоящей работы заключается в проведении анализа данных о температурах теплоносителя на абонентских вводах ИТП, особенностях теплового потребления на нужды горячего водоснабжения (ГВ) и выявлении причин обнаруженного сверхнормативного роста температуры сетевой воды в обратной магистрали тепловой сети на отдельных объектах Коммунального унитарного предприятия «Жилищно-коммунальное хозяйство г. Полоцка».

Теоретические аспекты работы и постановка задачи исследования. Отдельные теоретические и методологические вопросы, относящиеся к рассматриваемой проблеме, изложены в ранее опубликованных работах [1–5]. Так, в [5] нами установлено, что в обследованных жилых домах реальное удельное суточное (в расчёте на одного человека) потребление воды и теплоты на нужды ГВ, а также число проживающих в них людей существенно ниже нормативных значений. Поэтому использование для расчёта тепловой производительности водоподогревателей при модернизации ИТП этих зданий условно-нормативных значений привело в фактических условиях эксплуатации к завышению требуемой мощности ПТО на 20...46% и, как следствие, к резкому снижению их гидравлического сопротивления, нарушению работы автоматики ИТП.

При определении требуемой поверхности нагрева водоподогревателей используется величина средней разности температур теплоносителя, взятая по поверхности теплообмена [6; 7]:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta_{\delta} - \Delta_{\mu}}{\ln \frac{\Delta_{\delta}}{\Delta_{\mu}}}, \quad (1)$$

где Δ_{δ} и Δ_{μ} – соответственно, бóльшая и меньшая разности температур греющего и нагреваемого теплоносителя на входе и выходе водоподогревателя, °С.

Применительно к условиям неотопительного периода при противоточном движении теплообмениваемых сред в водоподогревателе значения этих разностей температур напрямую зависят от принятого

в расчёт температурного графика вследствие того, что разности температур связаны с температурами греющего теплоносителя в подающей и обратной магистрали тепловой сети следующими соотношениями:

$$\Delta_{\sigma} = T_1 - t_2; \quad \Delta_{\mu} = T_2 - t_x, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – температуры греющего теплоносителя соответственно на входе и выходе водоподогревателя, °С; t_2 и t_x – температуры нагреваемой воды соответственно на выходе и входе водоподогревателя, °С.

Конечное значение температуры нагреваемой воды t_2 изменяется незначительно, так как нормируется и поддерживается системами автоматического регулирования на постоянном уровне 60 °С (в зависимости от выбранной величины «уставки»), а t_x практически не изменяется в течение неоперативного периода и принимается равной 10 °С [8–10]. Гораздо большей неопределённостью обладают величины T_1 и T_2 . Первая из них зависит от температуры теплоносителя, поддерживаемой на коллекторах источника теплоснабжения, и от тепловых потерь трубопроводами при транспорте греющего теплоносителя в конкретный ИТП. Вторая зависит от величины расхода нагреваемой воды в системе ГВ, эффективности водоподогревателей и точности регулирования температуры нагреваемой воды.

Достичь требуемого значения температуры t_2 возможно только при температуре греющего теплоносителя на входе водоподогревателя не ниже 60...65 °С. В общем виде это условие может быть сформулировано следующим образом [8–10]:

$$T_1 = t_2 + \delta_t; \quad 60 \leq t_2 \leq 65 \text{ °С}; \quad 5 \leq \delta_t \leq 10 \text{ °С}. \quad (3)$$

В противном случае, если $\delta_t \rightarrow 0$, то $t_2 \rightarrow T_1$ и величина Δ_{μ} в уравнении (1) становится бесконечно малой, а заданная температура t_2 – теоретически недостижимой, требующей при конечной поверхности теплообмена водоподогревателя неограниченного роста расхода греющего теплоносителя. Такое увеличение расхода греющей сетевой воды, в свою очередь, приведёт к соответствующему неуклонному повышению её температуры на выходе из водоподогревателя: $T_2 \rightarrow T_1$.

Важным параметром теплообменника является его эффективность ϵ , представляющая собой отношение фактической величины нагрева $\delta_{нагр.}$ (или величины охлаждения $\delta_{охл.}$) теплообмениваемых сред к максимальной разности температур $\delta_{макс.}$, наблюдаемой в теплообменнике [7]:

$$\epsilon_{охл.} = \frac{\delta_{охл.}}{\delta_{макс.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_x}; \quad \epsilon_{нагр.} = \frac{\delta_{нагр.}}{\delta_{макс.}} = \frac{t_2 - t_x}{T_1 - t_x}. \quad (4)$$

Первое отношение называется эффективностью охлаждения, а второе – эффективностью нагрева. Мерой эффективности теплообменника является коэффициент нагрева или охлаждения, относящийся к меньшему из расходов теплообмениваемых сред [7]. Эффективность теплообменника напрямую связана с его конструктивными параметрами: коэффициентом теплопередачи и поверхностью теплообмена. Чем выше их произведение – тем выше эффективность.

В системе ГВ с целью поддержания необходимой температуры горячей воды во всех водоразборных точках и в полотенцесушителях организуется непрерывная её циркуляция. Обеспечивается циркуляция за счёт работы устанавливаемых в ИТП циркуляционных насосов. Расчётная подача циркуляционного насоса складывается из собственно циркуляционного расхода, зависящего от степени остывания воды в трубопроводах системы ГВ, и дополнительно некоторой доли максимального водоразбора, необходимой для предотвращения «запирания» циркуляции в дальних от ИТП стояках в случае максимальных водоразборов в ближних стояках системы. Действующие технические нормативные правовые акты (ТНПА) не регламентируют методику расчёта величины подачи циркуляционного насоса. В [11, с. 110] предложено обеспечивать циркуляцию горячей воды в трубопроводах и стояках системы ГВ при наличии водоразбора путём повышения перепада давления, развиваемого циркуляционным насосом, по сравнению с перепадом давления, который достаточен в отсутствие водоразбора. Величина требуемого перепада давления в этом случае определяется по формуле:

$$\Delta P = \Delta p_1 \cdot \left(\frac{x \cdot G_{\max} + G_u}{G_u} \right)^2 + \Delta p_2, \quad (5)$$

где Δp_1 и Δp_2 – потери давления соответственно в подающих и циркуляционных трубопроводах системы горячего водоснабжения, кПа; G_{\max} – величина максимального водоразбора в системе ГВ на выходе из ИТП, равная максимальному часовому расходу воды на нужды горячего водоснабжения, м³/ч; G_u – ве-

личина циркуляционного расхода в отсутствие водоразбора, м³/ч; x – доля от максимального водоразбора, учитываемая при подборе насоса и принимаемая равной 0,2...0,3 [11].

Величина максимального водоразбора в системе ГВ G_{max} зависит от фактической численности водопотребителей. Её завышение в результате использование нормативных, а не фактических показателей водопотребления ведёт к необоснованному росту расчётных величин подачи и давления циркуляционного насоса при его подборе, что в конечном итоге обуславливает увеличение средней температуры нагреваемой среды по поверхности теплообменника Δt_{cp} при фактически меньших величинах водоразбора на нужды ГВ, поскольку при избыточной подаче циркуляционного насоса горячая вода не успеет должным образом остыть в трубопроводах внутридомовой сети и будет возвращаться в водоподогреватель с температурой, близкой к t_2 .

С учётом всех отмеченных выше обстоятельств к задачам данного исследования отнесено установление влияния на температуру греющего теплоносителя, покидающего ПТО, эксплуатационных факторов, таких как: 1) начальная температура греющего теплоносителя на входе водоподогревателя; 2) величина запаса поверхности нагрева водоподогревателя; 3) величина циркуляционного расхода через подогреватель при наличии водоразбора и в его отсутствии.

Полученные результаты. Для определения влияния температуры T_1 на величину T_2 при заданном значении t_2 осуществлён численный эксперимент с использованием специализированной компьютерной программы [12].

Расчёты выполнены при следующих заданных условиях:

- водоподогреватель «Данфос-Ридан» НН-14-16/1-39 2х ТКТЛ 37, 50 мм с поверхностью теплообмена 5,41 м² и расчётной максимальной тепловой производительностью 0,2483 Гкал/ч, работающий при величинах водоразбора на нужды горячего водоснабжения, близких к фактическим средним значениям, определённым в работе [5];

- t_2 изменялась ступенчато: 53 °С, 55 °С, 57 °С;

- принятый циркуляционный расход воды в системе ГВ соответствует величине остывания воды в трубопроводах не более чем на $\delta t = 10,5$ °С.

Одновременно выполнены исследования влияния недостатка или избытка поверхности нагрева водоподогревателя на температуру греющего теплоносителя на выходе подогревателя ГВ. Температура нагрева холодной воды задавалась равной $t_2 = 57$ °С.

Результаты расчётов представлены на рисунках 1 и 2.

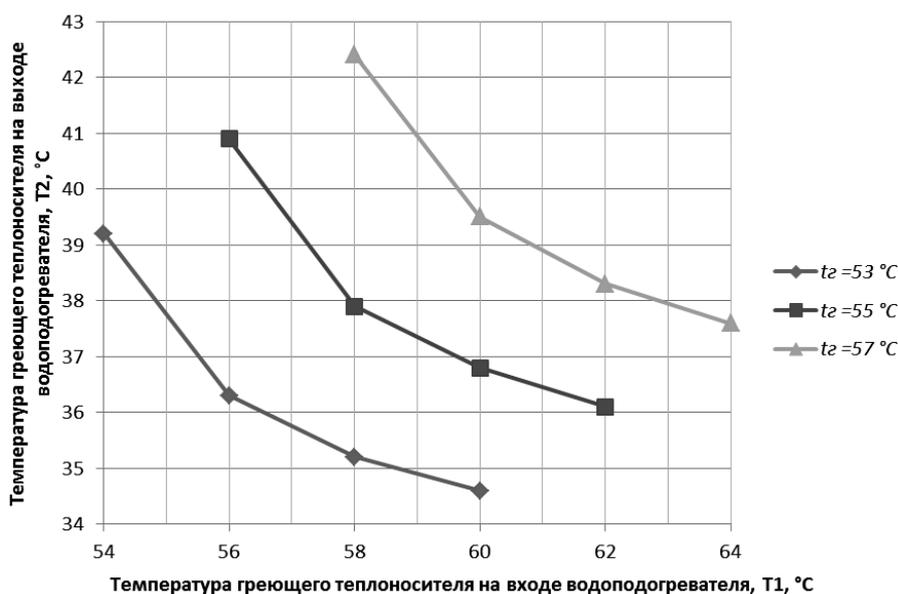


Рисунок 1. – Зависимость температуры греющего теплоносителя на выходе водоподогревателя от его температуры на входе при различных заданных температурах нагрева холодной воды

Как следует из графиков, изображённых на рисунке 1, по мере снижения температуры теплоносителя на входе водоподогревателя и её приближения к заданному значению температуры нагрева холодной воды ($T_1 \rightarrow t_2$) температура греющей воды на выходе подогревателя T_2 неуклонно растёт. Этот рост тем заметнее, чем выше значение температуры t_2 .

Таким образом, в рассматриваемых условиях в неотапливаемый период следует ожидать сверхнормативного роста температуры греющего теплоносителя T_2 на выходе водоподогревателя ГВ в случае снижения температуры T_1 до значений $59\text{ }^\circ\text{C}$ и более низких.

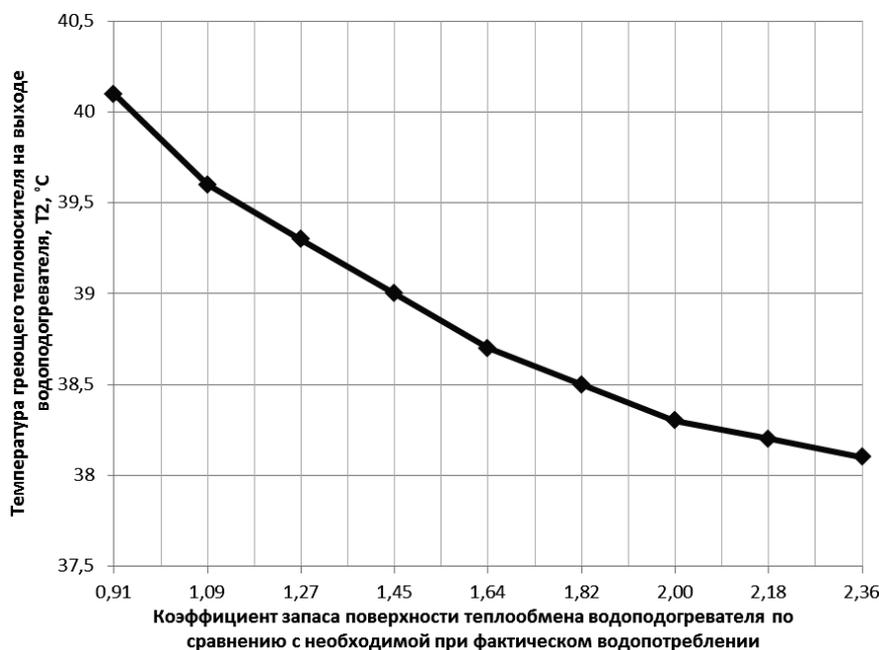


Рисунок 2. – Зависимость температуры греющего теплоносителя на выходе водоподогревателя от величины запаса поверхности теплообмена

Согласно данным, приведённым на рисунке 2, запас тепловой мощности теплообменника, поверхность нагрева которого определена на основании нормативных показателей водопотребления, обеспечивает снижение температуры греющего теплоносителя на выходе водоподогревателя при тепловых нагрузках, соответствующих более низкому фактическому расходу воды на нужды ГВ, чем нормативные.

На стадии проектирования расчёт и подбор оборудования ИТП, в том числе и циркуляционного насоса, выполняется по нормативным значениям расходов. Однако, как установлено в ходе проведённых исследований, в реальных условиях эксплуатации фактическое водопотребление существенно ниже нормативного, и циркуляционный расход, поддерживаемый более мощным, чем требуется, циркуляционным насосом, оказывается более высоким, чем расход горячей воды, идущей на водоразбор. В этом случае исходная температура нагреваемой в водоподогревателе воды будет значительно выше обычно принимаемых $5...10\text{ }^\circ\text{C}$, так как к потоку холодной водопроводной воды добавляется близкий или больший по величине циркуляционный расход с более высокой температурой. Рост начальной температуры нагреваемой воды снижает эффективность охлаждения греющего теплоносителя в водоподогревателе. Очевидно, что с увеличением доли циркуляционного расхода в общем расходе воды, поступающей в водоподогреватель, повышается начальная температура нагреваемой в водоподогревателе воды, а следовательно, возрастает и температура греющего теплоносителя T_2 , возвращаемого в тепловую сеть.

Для определения влияния соотношения величин G_H и $G_{\text{общ}} = G_H + G_X$ на температуру греющей сетевой воды, возвращаемой в тепловую сеть, выполнены численные исследования той же цифровой модели теплообменника, что и в предыдущем случае. В ходе численных экспериментов определялись температуры греющей воды на выходе из водоподогревателя при различных циркуляционных расходах и величинах водоразбора.

Исследуемая цифровая модель водоподогревателя соответствовала расчётной тепловой нагрузке, равной $0,2483\text{ Гкал/ч}$, при среднем расходе идущей на потребление нагреваемой водопроводной воды $1,44\text{ т/ч}$. В реальных условиях, соответствующих фактическому, а не нормативному водопотреблению, такой водоподогреватель эксплуатируется в обследованных зданиях при среднем расходе нагреваемой воды, составляющем $0,324\text{ т/ч}$. Требуемый циркуляционный расход при величине остывания воды $\delta t = 15\text{ }^\circ\text{C}$ равен $0,8\text{ т/ч}$. В связи со значительным снижением фактического расхода нагреваемой воды по сравнению с нормативным гидравлические потери в подогревателе и трубопроводах оказываются существенно более низкими, чем принятые при выборе насоса, и в результате рабочая точка на его характеристике перемещается в область больших расходов.

Результаты проведенного исследования представлены графически на рисунке 3.

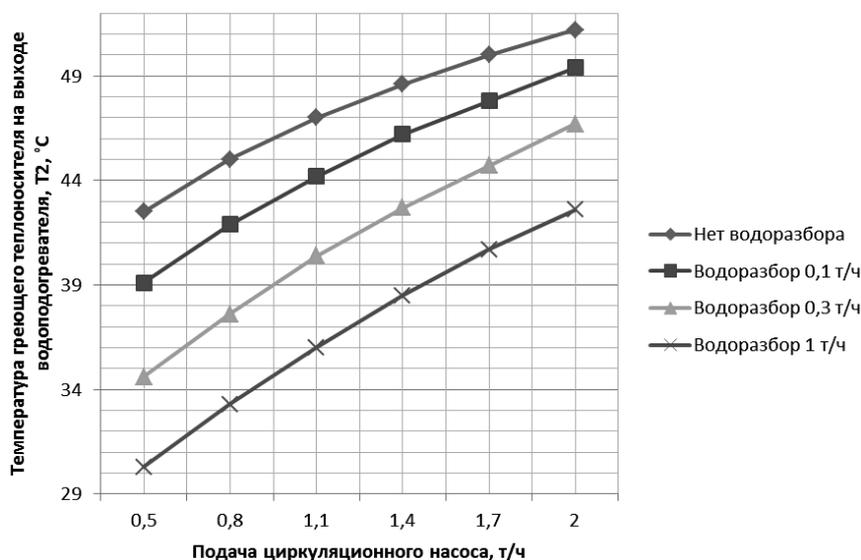


Рисунок 3. – Зависимость температуры греющего теплоносителя на выходе водоподогревателя от подачи циркуляционного насоса и величины водоразбора

Как видим, вся область представленного на рисунке 3 графика, расположенная правее ординаты 0,8 т/ч и выше линии, соответствующей величине водоразбора 0,3 т/ч, является областью, содержащей значения температуры греющей сетевой воды T_2 на выходе из водоподогревателя ГВ, превышающие допустимые для неотапливаемого периода.

Заключение. В результате выполненных исследований установлено, что сверхнормативный рост температуры греющего теплоносителя на выходе подогревателей горячего водоснабжения в ИТП обследованных жилых зданий в неотапливаемый период обусловлен комплексом следующих взаимосвязанных причин:

- 1) несоответствием фактических расходов теплоносителя расчётным значениям;
- 2) снижением фактических температур греющего теплоносителя в подающей магистрали тепловой сети по сравнению с требуемыми значениями;
- 3) несоответствием установленной мощности водоподогревателей фактической тепловой нагрузке;
- 4) высокой долей циркуляционного расхода в общем расходе нагреваемой воды, проходящей через водоподогреватель при малых величинах водоразбора.

Проведённый анализ полученных данных показал, что увеличение температуры греющего теплоносителя на выходе подогревателя составило 0,8...0,85 °C на каждый градус снижения его входной температуры и 0,3...0,4 °C на каждые 10% роста циркуляционного расхода сверх требуемого. В то же время двукратный запас поверхности теплообмена водоподогревателя по сравнению с её необходимым размером обеспечивает снижение температуры греющего теплоносителя на выходе подогревателя, но не более чем на 1,5 °C (при условии обеспечения требуемых величин циркуляционного расхода и температуры греющего теплоносителя на входе водоподогревателя).

ЛИТЕРАТУРА

1. Нияковский, А.М. Формирование рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий при их модернизации / А.М. Нияковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 93–98.
2. Нияковский, А.М. Выбор оптимальной плотности теплового потока при расчёте тепловой изоляции трубопроводов с целью обеспечения заданного коэффициента полезного действия тепловой сети и снижения выброса вредных веществ в атмосферу / А.М. Нияковский, Ф.И. Москалёнок, А.Ю. Сидорова // Материалы докладов 50 Международной науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. году науки. Т. 1. – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2017. – С. 299–302.
3. Нияковский, А.М. К выбору плотности теплового потока при проектировании тепловой изоляции тепловых сетей / А.М. Нияковский, Э.И. Гончаров, О.И. Мишута // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 147–155.

4. Нияковский, А.М. Управление температурными режимами тепловых сетей с целью снижения энергопотребления в системах теплоснабжения / В.А. Пшеничнюк, А.В. Григорович // Материалы докладов 48 Междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. 50-летию университета : в 2 т. Т. 2. – Витебск : Витеб. гос. технол. ун-т, 2015. – С. 76–78.
5. Нияковский, А.М. Особенности подбора пластинчатых теплообменников горячего водоснабжения в модернизируемых тепловых пунктах жилых зданий / А.М. Нияковский, А.А. Нияковский, А.Ю. Сидорова // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 158–164.
6. Исаченко, В.П. Теплопередача : учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 417 с.
7. Соколов, Е.А. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов. – 8-е изд., стереот. / Е.А. Соколов. – М. : Издат. дом МЭИ, 2006. – 472 с.
8. Системы внутреннего водоснабжения зданий. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.01-52-2007 / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2008. – 47 с.
9. Тепловые пункты. Правила проектирования : ТКП 45-4.02-183-2009 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск 2010. – 47 с.
10. Тепловые сети. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-4.02-182-2009 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 53 с.
11. Теплоснабжение : учебник для вузов / А.А. Ионин [и др.] ; под ред. А.А. Ионина. – М. : Стройиздат, 1982. – 336 с.
12. Расчётная программа «Ридан» [Электронный ресурс] / АО «Ридан». – Режим доступа: http://www.ridan.ru/raschet-i-zakaz/raschetnaja_programma_ridan. – Дата доступа: 30.01.2018.

Поступила 14.05.2018

**A STUDY OF THE FACTORS LEADING TO THE TEMPERATURE EXCESS
OF HEATING MEDIUM OUTLET OF PLATE HOT WATER HEAT EXCHANGERS
IN INDIVIDUAL HEATING PLANTS OF RESIDENTIAL BUILDINGS**

A. NIYAKOVSKI, F. MOSKALIONAK, A. NIYAKOVSKI

Based on the analysis of the factual data on the operation of hot water supply units in the existing individual heating plants of residential buildings equipped with plate hot water heat exchangers, numerical studies of the factors causing the water temperature increase in the return line of the heat network in the non-heating (summer) period are performed. These factors include: non-compliance of the installed capacity of water heaters with the actual consumption of thermal energy, a high proportion of the circulation flow in the total flow of heated water at low values of its consumption, and the reduced temperature of the primary coolant at the inlet of the heat exchanger.

Keywords: *plate heat exchangers, hot water heat supply, thermal charts, numerical experiment.*

УДК628.3.16

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЛОЖНОГО СОСТАВА**

*канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО; Е.С. ВЕЛЮГО;
канд. техн. наук С.И. ПИВОВАРОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Проанализирована проблема системы водоснабжения малых объектов. Рассмотрены процессы удаления железа из подземных вод. Приведена сравнительная оценка различных видов фильтрующих загрузок. Выполнен анализ первоначального периода работы фильтров с песчаной и угольной загрузкой при использовании различных методов обезжелезивания воды. Установлено, что применение угольной загрузки более эффективно, чем песчаной.

Ключевые слова: *фильтрующие загрузки; состав, свойства; механизм фильтрации; подземные воды сложного состава; обработка; песчаная и угольная загрузка.*

Водоснабжение малых населенных мест в Республике Беларусь на 100% осуществляется из подземных источников, причем более чем на 60% территории наблюдается повышенное содержание в воде соединений железа, а также других элементов и соединений.

Железо в подземных водах нередко находится в виде бикарбоната закисного железа, органического или неорганического соединения в коллоидном состоянии, а также тонкодисперсных примесей. При низких значениях рН преобладает двухвалентная форма железа Fe^{2+} и $Fe(OH)_2$. Повышение значения рН более 6,5 приводит к окислению железа (II) в железо (III), которое в виде $Fe(OH)_3$ выпадает в осадок. На окисление 1 мг железа (II) расходуется 0,143 мг растворенного в воде кислорода. Процесс обогащения воды кислородом при контакте ее с воздухом происходит весьма интенсивно.

Однако в некоторых районах Республики Беларусь встречаются подземные воды, содержащие в повышенных концентрациях, кроме общего железа, множество других загрязняющих элементов и соединений, например, марганец, аммонийный азот, сероводород, метан, нефтепродукты, микробиологические загрязнения и т.д. [1–3], т.е. вода может иметь сложный состав с точки зрения ее обработки. В воде могут содержаться вещества и соединения, установить влияние которых на процесс обезжелезивания достаточно сложно, а иногда и трудно выполнимо. Причем удаление железа возможно только после окисления марганца и удаления растворенных газов.

Таким образом, в первую очередь протекают реакции окисления, гидролиза и удаления различных солей и растворенных газов, и только в этом случае конечным продуктом является образование гидроксида железа.

В настоящее время для обработки воды сложного состава малых объемов водопотребления применяются фильтры с различными загрузками, системами аэрации и использования реагентов, но не всегда обеспечивающие необходимый эффект удаления загрязнений [4].

Рассмотрим некоторые фильтрующие загрузки, применяемые для обработки сложного состава воды.

К традиционным загрузкам относят *инертные материалы* (песок, керамзит, доломит, уголь и его производные), которые являются сорбентами без изменения своего состава при контакте с водой, предварительно насыщенной кислородом (в основном из воздуха), концентрации которого достаточно для окисления не только железа, но и других загрязнителей подземных вод, прежде всего марганца, сероводорода и аммонийного азота. Обычно, если в воде содержится только железо, достаточно провести аэрацию объемом 0,1 м³ воздуха на 1,0 м³ воды, но при сложном составе это соотношение должно быть не менее 0,4:1,0 [5]. Скорость фильтрации рекомендуется принимать 7...10 м/ч.

Физико-химические процессы окисления марганца и железа основаны на способности воды, содержащей растворенный кислород, при фильтровании через зернистый слой выделять эти соединения на поверхности зерен, образуя каталитическую пленку из ионов и окислов. На зернах фильтрующего слоя одновременно происходят реакции окисления и гидролиза. Процесс является гетерогенным автокаталитическим, в результате чего обеспечивается непрерывное обновление пленки как катализатора непосредственно при работе фильтра [6].

К недостаткам следует отнести длительное время (иногда 4–6 месяцев и более) «зарядки» фильтров до получения нормативных концентраций загрязнений в фильтрате при исходной воде сложного состава, большой удельный вес и гидравлическое сопротивление загрузки, что приводит к значительным энергетическим и эксплуатационным затратам.

Следующая группа фильтрующих загрузок представляет собой *материалы, обработанные окислителями, или в виде катионитов*, которые периодически должны восстанавливать свои первоначальные свойства реагентными способами [7]. Отличительной особенностью таких загрузок, в сравнении с традиционными материалами, является быстрое, практически мгновенное, получение воды требуемого качества по марганцу и железу. Они могут работать без предварительной аэрации воды. Скорость фильтрации составляет 15...30 м/ч, удаление задержанных загрязнений происходит обратной промывкой фильтров. Однако при продолжительном фильтровании часто происходит снижение окислительных свойств и повышение концентраций загрязнений, в результате чего требуется их регенерация.

Наиболее характерными материалами в первом случае являются кварцевые пески, обработанные окислителями, часто растворами $KMnO_4$ («черные» или «зеленые» пески, MZ «Greensand»). В последнее время интенсивно рекламируется *фильтрующий материал BIRM* (США). При его использовании необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- содержание растворенного кислорода должно быть не менее 15% от содержания железа. Увеличение содержания кислорода приводит к значительному улучшению работы установки. В большинстве случаев уровень содержания кислорода недостаточен даже для выполнения минимальных требований, поэтому необходимо использовать дополнительную аэрацию воды с помощью специальных устройств (воздушный эжектор, компрессор или аэрационная колонна);

- величина рН должна быть не менее 6,8, скорость фильтрации в рабочем режиме – до 12 м/ч. При высоких давлениях и скоростях фильтрации удерживающие на поверхности загрузки агломераты гидроксида железа могут в результате их отрыва перейти в очищенную воду;

- рабочая емкость BIRM по железу принимается не более 1100 мг-экв Fe/дм³ загрузки. Необходимо, чтобы в воде отсутствовали сероводород, нефтепродукты и полифосфаты, а перманганатная окисляемость не превышала 5 мг/дм³. Окисление железа происходит до тех пор, пока марганцевое покрытие загрузки участвует в этом процессе. Загрузка BIRM может быть использована для снижения содержания марганца. В этом случае необходимы более высокие значения рН, чем для обезжелезивания (оптимально 8...9), к тому же следует учитывать, что при наличии в воде кислорода железо может практически не поддаваться окислению с переходом в коллоидное состояние.

В качестве катионитов представляет интерес использование комплексных материалов типа Ecomix C, FeroSOFT A, SuperFerox и др. (производитель предприятия России, Украины, Беларусь), заряженные ионами натрия. Это многоцелевые ионообменные крупнопористые материалы, состоящие из смеси органических высокомолекулярных катионообменных смол, иногда с дополнительной кварцевой подложкой, подобранных в специальных пропорциях для обеспечения одновременного удаления железа, удаления марганца, содержания аммония и алюминия. Снижения окисляемости и общей жесткости. Для регенерации фильтрующей загрузки используется хлорид натрия из расчета 80...100 мг/дм³ катионита, что значительно усложняет процесс обработки воды.

Представленные комплексные материалы отличаются от обычных катионитов своим структурным составом и избирательной способностью по марганцу и железу, прежде всего КУ-1 и КУ-2, зарубежных марок IRC-50, Вофатит С и др., главная цель которых – умягчение воды, однако требуют тщательного предварительного осветления и обесцвечивания.

Общий вывод по этой группе материалов – высокая их стоимость, низкая способность удаления растворенных газов, а применение растворов окислителей или таблетированной соли (хлорид натрия) значительно усложняет процесс обработки воды.

Начиная с 2000-х годов в практике водоподготовки, особенно при малых объемах водопотребления и любого концентрационного состава, стали широко использовать группу сорбентов, имеющих в своем составе как главную составляющую алюмосиликатную группу. Также в состав могут входить пластификаторы, порообразователи, ПАВ и СПАВ [8].

Основой для получения этих материалов служит доломит (тип МЖФ), пиролюзит (сорбенты АС и МС), определенные сорта глины (цеолиты) и т.д.

Каталитические алюмосиликатные сорбенты не обработаны дополнительно химически активными покрытиями на основе марганца или активного металла. Это одно из принципиальных отличий сорбента от загрузок типа BIRM, Greensand, МЖФ, а также черных песков. Активные компоненты входят в структуру гранул сорбента равномерно, что обеспечивает их работу при удалении широкого спектра загрязнений, включая железо, стронций, алюминий, нефтепродукты, фенол, фтор, растворенные газы и др.

Область использования данных материалов чрезвычайно широка – от локальных бытовых систем очистки воды, устанавливаемых в загородных домах и городских квартирах, до муниципальных станций водоподготовки, станций водоподготовки промышленных предприятий, котельных и других объектов хозяйственной деятельности. Если применяются многоступенчатые схемы фильтрования, то фильтры с сорбентами рекомендуют устраивать, как правило, в начале технологической цепочки, которые принимают на себя основной объем загрязнений.

В отдельных случаях применяются совместно различные марки сорбентов (например, АС и МС), в результате чего повышается их активность не только по железу, но и в отношении других загрязнений.

Данные по воздействию сорбентов на дисперсную водную систему из подземных источников противоречивы и окончательно еще не установлены. Эти материалы являются щелочными по своей сути, и во время контакта поверхности гранул и воды происходит локальное увеличение pH воды, которое сдвигает реакции окисления Fe^{2+} в Fe^{3+} с образованием $Fe(OH)_3$. Их представляют как катализаторы окисления в реакциях взаимодействия растворённого кислорода с соединениями различных катионов, например, железа (II) и (III), в результате чего образуются их гидроксиды, которые переводятся в нерастворимую форму с последующим удалением в фильтрах обратным током воды. Предполагается, что при наличии алюмосиликатной группы на его гранулах формируется каталитическая плёнка гидроксидных катионов, которая ещё больше повышает сорбционные свойства материала уже как инертной загрузки, обуславливая тем самым продолжительность её работы (7–10 лет).

Однако из опыта эксплуатации фильтров ряда установок водоподготовки малых объемов водопотребления в Витебской области, которые загружены подобными сорбентами (АС, ZEOL), установлено, что через 6–12 месяцев их работы показатели воды резко ухудшаются, и требуется их замена. Скорее всего, эти материалы являются адсорберами, и со временем происходит истощение алюмосиликатной составляющей без возможности их регенерации.

Следует отметить довольно высокую стоимость всех рассмотренных материалов по сравнению с традиционными загрузками скорых фильтров при обработке подземных вод сложного состава.

По зарядке фильтров с традиционными загрузками на ряде малых объектах со сложным составом подземных вод были проведены эксперименты с использованием кварцевого песка и коксующего антрацита. Начальные концентрации загрязнений составили: Fe^{2+} – до 3,4; Fe^0 – 4,5; Mn^{2+} – 1,0; H_2S – 1,3 мг/дм³, в малых количествах присутствовали бор и литий. Предварительное азирование производилось по соотношению 0,45 м³ воздуха на обработку 1 м³ воды. Скорость фильтрации для начального периода работы фильтров была принята не более 5 м/ч. Промывка обратным током воды выполнялась через каждые трое суток работы фильтров. Результаты представлены на рисунке 1.

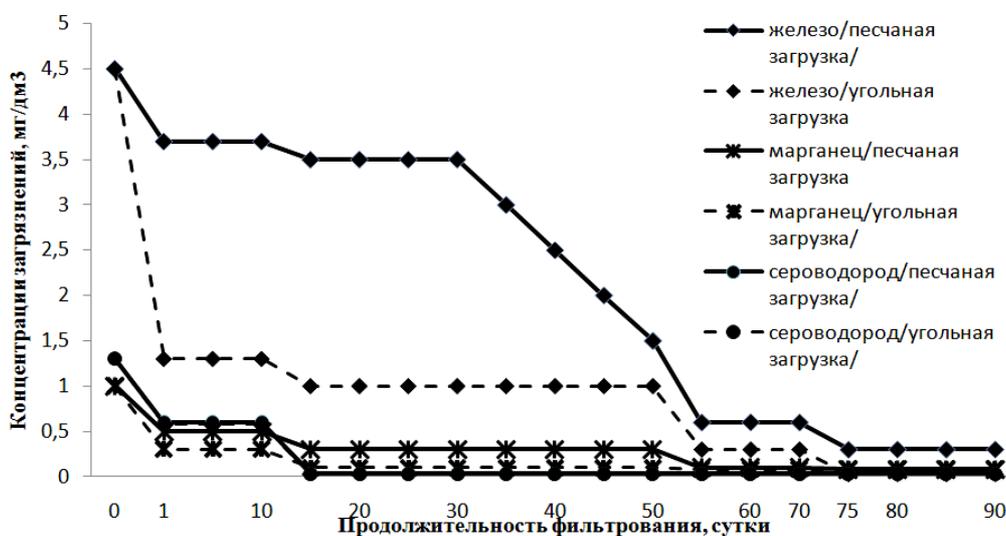


Рисунок 1. – Вывод («зарядки») фильтров с песчаной и угольной загрузкой при обработке подземной воды сложного состава

Заключение. Полученные результаты подтверждают, что продолжительность «зарядки» фильтров имеет длительный период. Скорость фильтрации при этом может быть повышена до 10 м/ч, но при нормальной работе фильтров. Применение угольной загрузки, как было спрогнозировано, более эффективно, чем песчаной. В дальнейшем планируется более тщательное изучение использования модифицирующих загрузок для обработки подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуринович, А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения / А.Д. Гуринович. – Минск : Технопринт, 2001. – 304 с.

2. Ющенко, В.Д. К вопросу обезжелезивания воды для малых населенных пунктов / В.Д. Ющенко, Г.А. Подсадник // Труды БГТУ. – 2010. – № 7. – С. 244–249.
3. Ющенко, В.Д. Анализ работы систем водоснабжения малых населенных пунктов / В.Д. Ющенко, Е.С. Велюго // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. // Сборник материалов БрГТУ. – 2013. – С. 76–79.
4. Водозаборно-очистные сооружения и устройства / М.Г. Журба. – М. : Изд-во Астрель ; Изд-во АСТ, 2003. – 569 с.
5. Особенности совместного удаления железа и аммонийного азота из подземных водоисточников в сооружениях напорного типа / В.Д. Ющенко [и др.] // Развитие инженерно-технических методов природообустройства и водопользования : сб. науч. тр. – Калининград, 2018. – С. 98–108.
6. Николадзе, Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г.И. Николадзе. – М. : Стройиздат, 1978. – 160 с.
7. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : ТКП 45-4.01-320-2018. – Минск : НПП РУП «Стройтехнорм», 2018. – 65 с.
8. Сорбенты и сменные загрузки [Электронный ресурс] : каталог сорбентов и сменных засыпок для водоподготовки: БелАкваМир. – Дата доступа: 17.12.2018.

Поступила 21.12.2018

ANALYSIS OF THE USE OF FILTER MATERIALS TO REMOVE CONTAMINANTS FROM GROUND WATER COMPLEX COMPOSITION

E. VELYUGO, V. YUSHCHENKO, S. PIVOVAROVA

The article deals with the water supply system of small objects. The processes of iron removal from groundwater are considered. Comparative evaluation of different types of filter media. The analysis of the initial period of operation of filters with sand and coal loading using different methods of de-Ironing water. It is found that the use of coal loading is more effective than sand.

Keywords: *filter media; structure, properties; mechanism of filtration; groundwater complex composition; treatment; sand and coal download.*

ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 528.71

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАНА ФАСАДА ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБЗОРНОЙ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХЕОМЕТРА

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

(Витебское агентство по государственной регистрации и земельному кадастру)

Рассматриваются формулы основных процессов, которые необходимо выполнить при создании планов фасадов зданий, состоящих из плоских элементов, по снимкам, полученным обзорной камерой электронного тахеометра. Исходя из того, что снимки имеют малое перекрытие, использован способ одиночного снимка, при котором координату Y камерально в требуемой системе координат определить невозможно. Но в случае, когда ось Y фотограмметрической системы координат перпендикулярна фасаду здания, по опорным точкам, полученным электронным тахеометром, можно восстановить перпендикуляр к плоскости здания и определить его длину. В этом случае можно определить все три координаты (X, Y, Z) в требуемой системе координат любых точек сооружения. При отстояниях порядка 30 метров можно создать планы фасада здания с достаточной точностью масштабов 1:300 и мельче.

Ключевые слова: ортофотоплан, снимок, калибровка, координаты точек, направляющие косинусы.

Для того чтобы получить панораму здания или план фасада здания, необходимо выполнить трансформирование координат по следующим формулам [1]:

$$x_t = x_0 + f \frac{a_1 x + a_2 f + a_3 z}{b_1 x + b_2 f + b_3 z}, \quad z_t = z_0 + f \frac{c_1 x + c_2 f + c_3 z}{b_1 x + b_2 f + b_3 z}, \quad (1)$$

где x_t, z_t – трансформированные координаты точек снимка; x, z – значения координат точек, измеренных на снимке; x_0, z_0 – координаты главной точки снимка; f – величина фокусного расстояния обзорной камеры ($f = 21$ мм) [2]. Значение фокусного расстояния f должно быть известно, по крайней мере, до сотых долей миллиметра, т.е. мы будем использовать примерное значение. Так как обзорная камера не калибровалась, примем координаты главной точки $x_0 = z_0 = 0$ мм.

Направляющие косинусы a, b, c , вычисляемые через угловые элементы внешнего ориентирования снимка α, ω, κ , показаны на рисунке 1. Также на рисунке 1 приведена система координат снимка x и z .

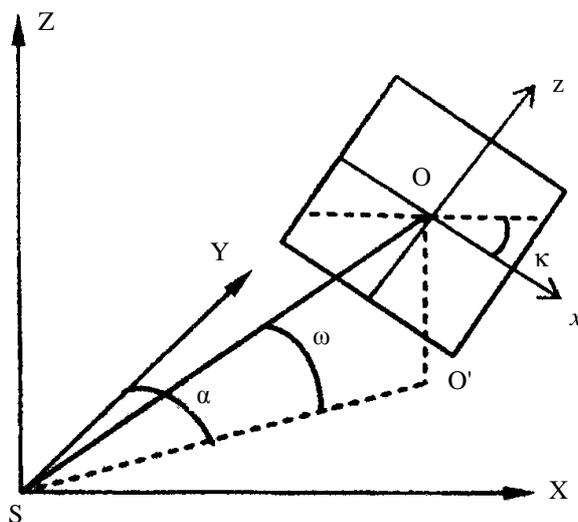


Рисунок 1. – Угловые элементы внешнего ориентирования

Направляющие косинусы могут быть найдены по формулам [1]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos\alpha \cdot \cos\kappa - \sin\alpha \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa; a_2 = \sin\alpha \cdot \cos\omega; a_3 = -\cos\alpha \cdot \sin\kappa - \sin\alpha \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa; \\ b_1 &= -\sin\alpha \cdot \cos\kappa - \cos\alpha \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa; b_2 = \cos\alpha \cdot \cos\omega; b_3 = \sin\alpha \cdot \sin\kappa - \cos\alpha \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa; \\ c_1 &= \cos\omega \cdot \sin\kappa; c_2 = \sin\omega; c_3 = \cos\omega \cdot \cos\kappa. \end{aligned} \quad (2)$$

Для снимка № 357 в работе [3] нами были получены угловые элементы внешнего ориентирования α , ω и κ . Приведем их в таблице 1.

Таблица 1. – Угловые элементы внешнего ориентирования

Дирекционный угол оптической оси	α^{357}	342°41'46",16
Угол наклона оптической оси	ω^{357}	16°38'31",8
Угол поворота снимка	κ^{357}	0°13'59",7

Для приведенных в таблице 1 углов значения направляющих косинусов сведем в таблицу 2.

Таблица 2. – Значения направляющих косинусов

Направляющие косинусы	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3
Значения	0,95508	-0,2850	0,08130	0,29632	0,91475	-0,2746	0,0039	0,28639	0,95810

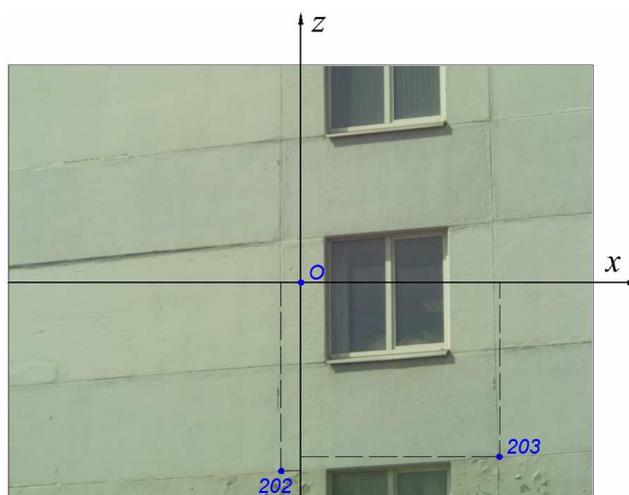
Для проверки рассматриваемой нами методики решения задачи выбрали точки 203 и 202, координаты которых на объекте были получены тахеометром в условной системе координат. Эти точки легко распознаются на снимке.

Координаты точек 203 и 202 приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Значения измеренных тахеометром координат в условной системе координат

Координата	X_Y , м	Y_Y , м	Z_Y , м
Точка 203	-10,710	-25,447	5,886
Точка 202	-13,652	-24,866	5,874

Чтобы измерить координаты по снимку, использовался программный комплекс AutoCAD 2007. Загрузив в программу снимок № 357, провели оси координат. Так как камера не калибровалась, приняли, что главная точка находится в центре снимка. Соединим середины противоположных сторон снимка, как показано на рисунке 2.



O – главная точка снимка;
202 и 203 – выбранные для примера точки;
 x и z – оси координат снимка

Рисунок 2. – Снимок № 153357, загруженный в AutoCAD

Значения измеренных координат для выбранных точек № 202 и 203 и трансформированных по формуле (1) сведем в таблицу 4.

Таблица 4. – Значения измеренных координат точек 203 и 202 на снимке

№ точки	203		202	
	x	z	x	z
Измеренные значения, мм	1,914	-1,693	-0,189	-1,832
Трансформированные значения, мм	-4,4553	4,5647	-6,7454	4,5497

Далее легко вычислить координаты точек объекта в фотограмметрической системе координат по следующим формулам [1]:

$$X = \frac{Y}{f} x_r, \quad Z = \frac{Y}{f} z_r, \quad (3)$$

где Y – отстояние от объекта, равное отрезку $SN = Y$ (рисунок 3).

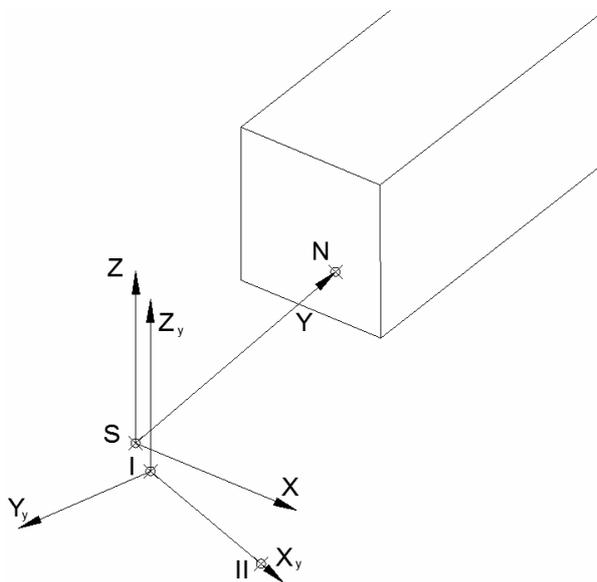


Рисунок 3. – Системы координат, принятые на объекте

На рисунке 3 показаны отстояние от объекта и условная система координат X_y, Y_y . Ось Z_y условной системы координат параллельна оси Z фотограмметрической системы координат.

Расстояние между точками S и N , которое обозначим Y' , нашли из обратной геодезической задачи по следующей формуле [1]:

$$Y' = \sqrt{(\Delta X_y^{S-N})^2 + (\Delta Y_y^{S-N})^2 + (\Delta Z_y^{S-N})^2}, \quad (4)$$

где $\Delta X_y^{S-N}, \Delta Y_y^{S-N}, \Delta Z_y^{S-N}$ – приращения координат между точками S и N в условной системе координат.

Так как в ходе калибровки $\Delta\omega = 0^\circ 07' 38''{,}6$ (не равно нулю), то чтобы получить отстояние, необходимо найти горизонтальное проложение полученного отрезка по формуле: $Y = D \cdot \cos\Delta\omega$. Вычисление отстояния Y сведём в таблицу 5.

Таблица 5. – Результаты вычисления отстояния Y

Приращения координат	Значение, м
ΔX_y^{S-N}	-5,1418
ΔY_y^{S-N}	-26,4774
ΔZ_y^{S-N}	0,0158
Вычисленное расстояние, Y'	26,972030
Вычисленное отстояние, Y	26,972026

Как видим, при столь малом угле $\Delta\omega$ отрезки Y' и Y практически не отличаются.

Далее мы нашли трансформированные координаты и координаты точки объекта в принятой нами системе фотограмметрических координат по формулам (1) и (3) соответственно.

Вычисленные значения представлены в таблице 6.

Таблица 6. – Результат вычисления X и Z в фотограмметрической системе координат

№ точки	x_t , мм	z_t , мм	X , м	Z , м
203	-4,4553	4,5647	-5,7224	5,8628
202	-6,7454	4,5497	-8,6636	5,8435

Получив координаты точек 203 и 202 в фотограмметрической системе координат, можно перейти в условную систему координат, чтобы сопоставить вычисленные координаты с координатами, определенными тахеометром. Формулы перехода получены на основании рисунка 4.

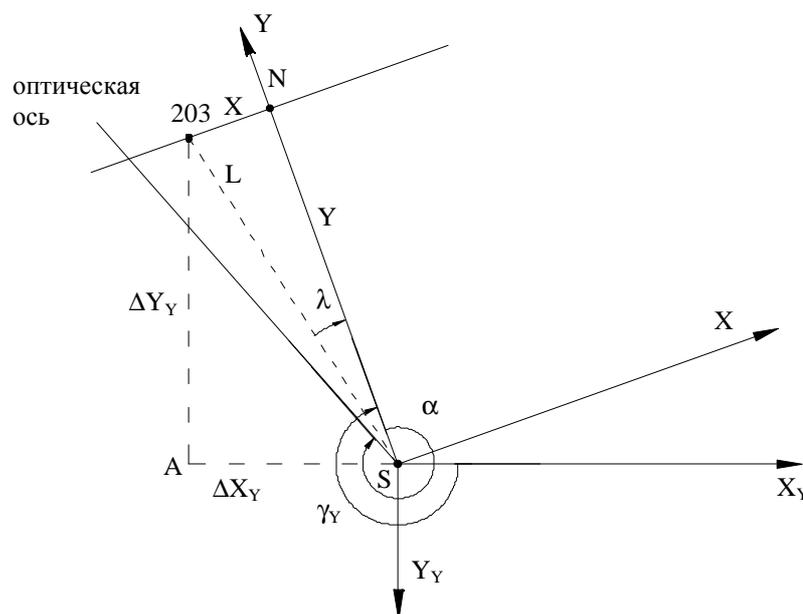


Рисунок 4. – Угловые и линейные элементы связи систем координат

Согласно рисунку 4 определим координату ΔX_Y точки 203 из треугольника $S203A$:

$$\Delta X_Y = L \cos(\gamma_Y - 180^\circ - \lambda), \quad (5)$$

где расстояние L получим по формуле:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (6)$$

γ_Y – угол от начального направления X_Y до направления оси Y .

Угол λ получим из треугольника $S203N$:

$$\lambda = \arctg \frac{X}{Y}. \quad (7)$$

На основании рисунка 4 можно определить и приращения ординат ΔY_Y в условной системе координат по формуле:

$$\Delta Y_Y = L \sin(\gamma_Y - 180^\circ - \lambda). \quad (8)$$

Приращения как абсцисс, так и ординат имеют знак «минус» для точек 203 и 202, что видно из рисунка 4. Однако ординаты точек или приращения ординат можно определять только в случае, если фасад здания плоский и направление оси Y фотограмметрической системы координат выбрано перпендикулярно фасаду здания.

По приведенным формулам можно вычислить и координаты любых определяемых точек. Результаты расчета приращений координат для точек 202 и 203 представлены в таблице 7.

Таблица 7. – Результаты расчета приращений координат для рассматриваемых точек 202 и 203

№ точки	L , м	λ	ΔX_Y , м	ΔY_Y , м
203	27,5724	11°58'41",51	-10,7592	-25,3865
202	28,3293	17°48'26",84	-13,6466	-24,8258

Координаты точек объекта в условной системе координат X_Y и Y_Y будут вычислены по формулам:

$$\begin{aligned} X_Y &= X_{S(Y)} + \Delta X_Y, \\ Y_Y &= Y_{S(Y)} + \Delta Y_Y. \end{aligned} \quad (9)$$

Координаты центра проекции S [3] представлены в таблице 8.

Таблица 8. – Координаты центра проекции S для снимка 357 в условной системе координат

$X_{S(Y)}$, м	$Y_{S(Y)}$, м	$Z_{S(Y)}$, м
-0,0027	-0,0381	0,0739

Аппликату Z_Y можно получить по следующей формуле [1]:

$$Z_Y = Z_{S(Y)} + Z + (k + r). \quad (10)$$

Поправка за кривизну Земли и рефракцию [1] вычисляется как

$$(k + r) = 0,42 \frac{Y^2}{2R}, \quad (11)$$

где Y – отстояние от объекта; R – радиус Земли.

В нашем случае расстояния до снимаемых точек равны примерно 27 м (см. таблицу 5). Расчеты показали, что поправка за кривизну Земли и рефракцию составила 0,02 мм на объекте. Так как при съемке фасада здания расстояния до снимаемых точек невелики, то в данном случае её можно не учитывать.

Для перехода в условную систему координат необходимо к полученным координатам прибавить координаты центра проекции S в условной системе координат, которые приведены в таблице 9.

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

№ точки	X_Y , м	Y_Y , м	Z_Y , м
203	-10,7619	-25,4246	5,9367
202	-13,6493	-24,8639	5,9174

Рассмотрим возможность использования формул стереофотограмметрии для вычисления координат точек плоских зданий в условной системе координат.

Для того чтобы перейти от фотограмметрических координат к координатам в условной системе координат, воспользуемся формулами для стереоскопической пары снимков [1]:

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

где $X_{S_Y}, Y_{S_Y}, Z_{S_Y}$ – координаты центра фотографирования в условной системе координат; X, Y, Z – фотограмметрические координаты точки объекта для случая, когда ось Y направлена перпендикулярно плоскости фасада здания; γ_Y – горизонтальный угол между осью X_Y и осью Y фотограмметрической системы координат, вычисленный в работе [3], который составил $\gamma_Y = 259^\circ 00' 36", 7$.

Воспользовавшись приведенными значениями угла γ_Y , отстояния Y (см. таблицу 5); координатами точек 203 и 202 в принятой нами системе координат (см. таблицу 6); данными координат центра проек-

ции S в условной системе координат (см. таблицу 8), по формулам (12) получим координаты точек объекта под номерами 203 и 202 в условной системе координат (таблица 10).

Таблица 10. – Координаты выбранных для примера точек объекта, полученные тахеометром в условной системе координат

Номера точек	X_Y , м	Y_Y , м	Z_Y , м
203	-10,7100	-25,4471	5,8856
202	-13,652	-24,866	5,874

Сравним полученные координаты точек с координатами, измеренными на местности (таблица 11).

Таблица 11. – Сравнение полученных координат с координатами на местности

Координаты в условной системе	Полученные	На местности	Разница
точка 203			
X_Y , м	-10,762	-10,710	-0,052
Y_Y , м	-25,425	-25,447	0,022
Z_Y , м	5,937	5,886	0,051
точка 202			
X_Y , м	-13,649	-13,652	0,003
Y_Y , м	-24,864	-24,866	0,002
Z_Y , м	5,918	5,874	0,044

Сопоставляя данные таблицы 9, полученные по формулам (6) и (9), с данными таблицы 11, вычисленными по формулам (12), видим, что они дали идентичные результаты.

Таким образом, можно сделать вывод, что целесообразно использовать формулы (12), так как в этом случае не надо определять знаки приращений координат.

Согласно Инструкции по фотограмметрическим работам [4] средняя ошибка в плане v_d не должна превышать 0,3 мм. Применительно к наземной съемке среднюю ошибку планового положения на объекте V_d можно получить через средние ошибки V_X и V_Z по следующей формуле:

$$V_d = \sqrt{V_X^2 + V_Z^2} = 0,073 \text{ м.} \quad (13)$$

Полученное значение рассчитано для точки 203, и в случае если предположить, что средние ошибки для любых точек будут такого же порядка, тогда средняя ошибка на плане будет определена по формуле:

$$v_d = \frac{V_d}{M}, \quad (14)$$

где M – знаменатель масштаба создаваемого плана.

Тогда для планов масштабов 1:100; 1:200 и 1:300 значения v_d будут равны величинам, приведенным в таблице 12.

Таблица 12. – Расчет средних ошибок на плане

M	100	200	300
v_d , мм	0,73	0,36	0,24

Согласно данным этой таблицы можно обеспечить точность создания планов масштаба 1:300 и мельче при условии, что отстояния не превысят 30 м. Однако на трансформированном снимке останутся искажения за рельеф фасада здания, и эти искажения должны быть учтены. Если какая-либо точка отстает от плоскости, в её положение необходимо ввести поправку за «рельеф» здания [5]:

$$\delta_h = -\frac{r\Delta Y}{Y + \Delta Y}, \quad (15)$$

где r – расстояние на снимках от точки надира до наиболее удаленной точки; ΔY – величина выступа («рельефа») здания; Y – расстояние от цифровой камеры до начальной плоскости трансформирования, в нашем случае – до плоскости фасада здания.

Наиболее удалённой точкой от точки надира является верхний левый край фасада здания (см. рисунок 2). Приняв высоту одного этажа три метра и вычислив знаменатель масштаба, можем рассчитать R .

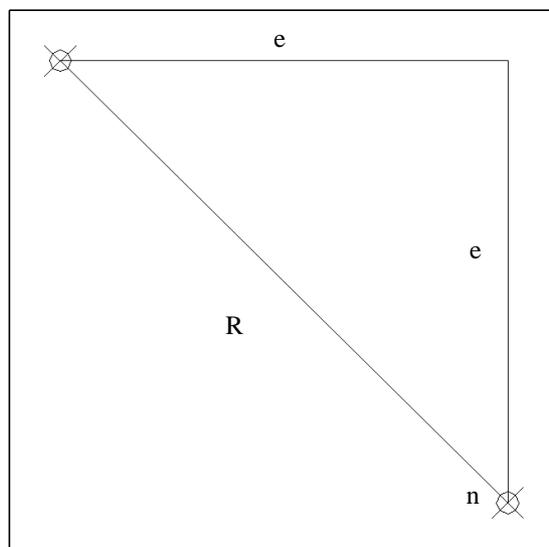


Рисунок 5. – Нахождение наиболее удалённой точки от точки надира

Здание имеет пять этажей, что эквивалентно 15 метрам, а длина основания примерно равна высоте фасада (e). Примем e 14 метров, тогда расстояние R на объекте составит

$$R = e\sqrt{2} = 14\sqrt{2} = 19,8 \text{ м.}$$

Знаменатель масштаба найдём по формуле [5]:

$$m = \frac{Y}{f} = 1284. \quad (16)$$

Тогда расстояние r в масштабе снимка будет равно

$$r = \frac{19,8}{1292} = 15 \text{ мм.}$$

Если величина выступа равна 10 см (оконный проем), то поправка за рельеф, вычисленная по формуле (15) $\delta_h = -0,06$ мм, т.е. пренебрегаемо малая величина.

Критерием соответствия фасада плоскости может служить допустимое превышение выступа $h_{доп}$, которое можно рассчитать по формуле [1]:

$$h_{доп} = \frac{fM}{r} \delta_{h(доп)}, \quad (17)$$

где f – фокусное расстояние цифровой камеры; M – знаменатель масштаба полученного плана; r – расстояние от точки надира до любой точки трансформированного изображения; $\delta_{h(доп)}$ – допустимая величина смещения, вызванная выступом фасада, обычно принимают 0,3 мм [4].

Если необходимо получить план в масштабе $1:M = 1:500$ с величиной смещения 0,3 мм [4], допустимый выступ фасада здания будет $h_{доп} = 20,5$ см.

Если на сооружении имеются выступы, превышающие рассчитанные величины (крыльцо, козырек над подъездом), необходимо создать цифровую модель рельефа и выполнить ортотрансформирование. При этом на плоских элементах здания использовать прореженную матрицу высот. Так, в программном комплексе Photomod, начиная с версии 3.6, прореженная матрица высот строится в модуле Photomod Mosaic на основе TIN, полученных в модуле Photomod DTM. В процессе создания ортофотоплана нерегулярная модель TIN автоматически перестраивается в регулярную матрицу высот DEM [6].

Размер ячейки матрицы высот задается в зависимости от размера фрагмента местности отображенного на пикселе ортофотоплана. Например, размер фрагмента местности Δ примем равным 10 см. Размер ячейки матрицы высот задается в 20...40 раз больше [6].

Ортотрансформирование и построение ортофотоплана по прореженной матрице выполняется с высокой скоростью. Однако часто на снимках присутствуют искусственные или естественные объекты больших размеров, выделяющиеся по глубине относительно плоскости фасада. Для достижения высокой точности трансформирования на таких участках требуется матрица высот высокого разрешения, шаг которой сопоставим с размером пиксела результирующего ортофотоплана, или в разреженную матрицу высот встраиваются трехмерные векторы, описывающие искомые возвышающиеся объекты. Такие участки выделяют, их обработка требует значительных вычислительных ресурсов, однако в связи с тем, что доля их по отношению к площади всего ортофотоплана невелика, общее время обработки увеличивается незначительно [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева, А.А. Фотограмметрия. Наземная стереофотограмметрическая съёмка : учеб.-метод. компл. для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия» и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальности 1-56 02 71 «Прикладная геодезия и геодезическое обеспечение кадастров» / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – 88 с.
2. Светочувствительная матрица МТ9Р031 : техническая документация компании Artna.
3. Михеева, А.А. Рекомендуемый алгоритм определения элементов внешнего ориентирования цифрового снимка, полученного с помощью обзорной камеры электронного тахеометра / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, Д.О. Волков // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 213–219.
4. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов : УП «БелНИЦЗЕМ», Минск, 2003. – 78 с.
5. Сердюков, В.М. Фотограмметрия в промышленном и гражданском строительстве / В.М. Сердюков. – М. : Недра, 1977. – 245 с.
6. Новоселов, В.Г. Использование модуля PHOTOMOD Mosaic для построения качественных ортофотопланов [Электронный ресурс] / В.Г. Новоселов. – М. : Ракурс. 2005. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=145>.

Поступила 20.12.2018

RECOMMENDED ALGORITHM FOR GETTING A BUILDING FRONT WITH SURVEY CAMERA OF THE TOTAL STATION

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, D. VOLKOV

The paper reveals the formal for major procedures, which need to be performed while creating the building fronts consisting of flat elements, by images made with the total station survey camera. Since the images have very little overlap, a single image method is used, which makes it impossible to define the Y coordinate in lab. However, in case of the Y axis being perpendicular to the building front, it is possible to restore the perpendicular to the building plane and define its length using the total station checkpoints. In this case all three (X, Y, Z) coordinates can be defined in the necessary grid system for any points of the building. At the 30-meter distance one can create building front plan with the necessary accuracy in the 1:300 scale or less.

Keywords: *orthophoto, the calibration, the coordinates of the points, the guides of the cosines.*

УДК 528.854

ПРИМЕНЕНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ В ФИЛЬТРАЦИИ ГЕОИНФОРМАЦИИ

д-р техн. наук, проф. А.С. ЯРМОЛЕНКО; О.В. СКОБЕНКО
(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)

Приведены основы теории преобразований Фурье в матричном виде в качестве исходной базы для программирования. С помощью специальных программ, составленных на языке Visual Basic Excel (VBE), исследована эффективность фильтрации шумов на основе преобразований Фурье. Показана возможность фильтрации случайных ошибок и сжатия геоинформации.

Ключевые слова: фильтрация, ряды Фурье, случайные ошибки, геоинформация.

Введение. Преобразование Фурье широко используется при обработке изображений. Фурье-образы позволяют анализировать частотный состав – спектр изображений. На основе анализа спектра выполняются сжатие изображений и их фильтрация, решаются задачи по улучшению и восстановлению изображений, по уменьшению смаза изображений и т.д. Фильтрация геоинформации необходима при определении отклонений показателей определенного явления от их средних или заданных (нормативных) значений, при мониторинге изменений различных явлений. Так, согласно [1], с помощью фильтрации можно осуществлять анализ сельскохозяйственных полей с посевами периодической структуры, выделять ярко выраженные темные и светлые пятна на изображениях полей сельскохозяйственных культур, определять области избыточного увлажнения, осушения почв, находить участки с недостающим количеством удобрений и с другими негативными отклонениями характеристик почв от нормальных параметров. Фильтрация необходима и для анализа рельефа местности по всем его характеристикам: высотам, уклонам, формам. Используя фильтрацию с помощью рядов Фурье можно подбирать проектные поверхности, наиболее подходящие к рельефу местности. Для практических целей важно отфильтровывать шумы (случайные ошибки): при топографических съемках – это ошибки определения координат точек, в том числе и высот; в технологиях точного сельского хозяйства [4] – это контуры, загрязняющие посевы; в мониторинге – это ошибки тематических данных или изменения параметров, характеризующих наблюдаемые объекты.

Исходя из того, что фильтрация геоинформации сопряжена с ее сжатием и сохранением необходимой точности, и учитывая неполную разработанность данного вопроса, тему представляемой работы следует признать актуальной.

Краткие сведения о матричном представлении дискретных преобразований Фурье. Основы матричного изложения теории рядов Фурье приведены в [2; 3]. При этом практическое значение имеют результаты работ [4; 5], полученные раньше, чем [2]. Согласно [2, с. 117], а также исходя из [4; 5] прямое преобразование Фурье (ППФ) может быть записано как

$$c = W_N \cdot Z. \quad (1)$$

Здесь

$$W_N = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_N^{1-1} & \omega_N^{1-2} & \dots & \omega_N^{1-(N-1)} \\ 1 & \omega_N^{2-1} & \omega_N^{2-2} & \dots & \omega_N^{2-(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \omega_N^{(N-1)-1} & \omega_N^{(N-1)-2} & \dots & \omega_N^{(N-1)-(N-1)} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

а $\omega_N^{nm} = e^{-i \frac{2\pi}{N} nm}$; i – комплексное число ($\sqrt{-1}$); n – номер гармоники; m – номер наблюдения Z_N (дискретное значение функции);

$$Z = \begin{pmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_{N-1} \end{pmatrix} \quad c = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_{N-1} \end{pmatrix},$$

c_N – коэффициент гармоники n ряда Фурье.

в которой

$$c_V^U = \begin{pmatrix} c_{U_0} \\ c_{V_0} \\ c_{U_1} \\ c_{V_1} \\ \dots \\ c_{U_{M-1}} \\ c_{V_{M-1}} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Тогда с учетом (11), (12), (13) вектор c можно представить как

$$c = V \cdot \bar{c}, \quad (14)$$

что идентично выражениям (8), (9).

Основные теоретические положения по теории фильтрации сигналов. Согласно теореме 3.3 в [6, с. 73] отфильтрованный сигнал может быть записан в непрерывном случае следующим образом:

$$f \cdot h[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \hat{h}(\omega) \hat{f}(\omega) \cdot d\omega, \quad (15)$$

где $\hat{h}(\omega)$ – передаточная функция (фильтр), ослабляющая или усиливающая частотные компоненты $\hat{f}(\omega)$ сигнала. Величины $\hat{f}(\omega)$ и $\hat{h}(\omega)$ являются преобразованиями Фурье функций f и h . При этом h называют характеристической функцией. Согласно [6, с. 40] фильтр определяется как оператор свертки.

Согласно лемме 2.30 [2, с. 144] преобразование Фурье свертки осуществляется так:

$$(Z \cdot \omega)^{\wedge}(m) = \hat{Z}(m) \hat{\omega}(m), \quad (16)$$

где $\hat{Z}(m)$, $\hat{\omega}(m)$ – соответственно преобразования Фурье функций Z и w . Построение фильтров является к настоящему времени сложной задачей [2, с. 186; 7, с. 265; 8, с. 262]. Однако их реализация возможна при анализе поведения волновых чисел соответственно амплитуд и фаз коэффициентов Фурье. Известно [2, с. 123], что в базисе Фурье низкие амплитуды преобразования Фурье группируются возле $m = N/2$, высокие – возле 0 и $N-1$. При этом по модулю амплитуды и фазы симметричны относительно $N/2$, а фазы гармоник от $N/2 + 1$ до $N - 1$ имеют обратный знак к фазам гармоник от 0 до N . Это обстоятельство позволяет хранить без потери информации лишь первую половину коэффициентов Фурье. Для практических целей может использоваться фильтр частот [6, с. 74], задаваемый передаточной функцией

$$\hat{h}(\omega) = 1[a, b](\omega), \quad (17)$$

равной 1 на $[a, b]$ и нулю вне этого интервала. При этом волновое число в (17)

$$\omega = \frac{2\pi m}{N}. \quad (18)$$

Таким образом с учетом (18), (19), (20) дискретный частотный фильтр (17) может быть записан как

$$Z_m \cdot h(n) = f \cdot h(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} c_m \cdot \hat{h}(\omega)^{+i \frac{2\pi}{N} mn}. \quad (19)$$

Исследование эффективности фильтрации шумов с использованием рядов Фурье. В основу исследований положены специально составленные авторами на языке Visual Basic Excel (VBE) программы алгоритмов преобразования Фурье – быстрого и обычного. В качестве модели исследований принята модель рельефа, приведенная в таблице 1.

Значения высот Z принимаются в качестве истинных, на основе которых будут моделироваться высоты, отягощенные случайными ошибками.

Таблица 1. – Исходные данные

	X	Y	Z
1	2000	1000	103,52
2	2000	1020	103,81
3	2000	1040	103,76
4	2000	1060	103,64
5	2000	1080	102,24
6	2020	1000	103,51
7	2020	1020	104,11
8	2020	1040	106,11
9	2020	1060	104,11
10	2020	1080	103,45
11	2040	1000	102,63
12	2040	1020	103,23
13	2040	1040	104,13
14	2040	1060	104,32
15	2040	1080	103,45

Соответствующий таблице 1 рельеф приведен на рисунке 1.

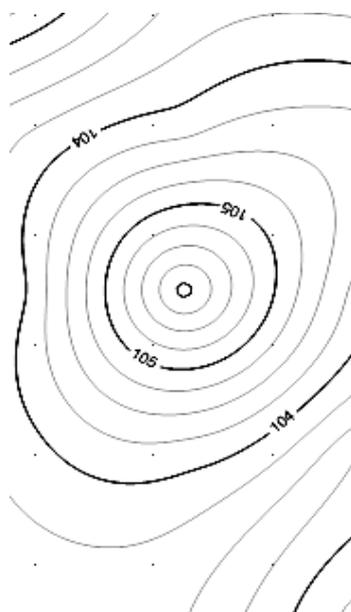


Рисунок 1. – Рельеф в горизонталях, построенный по высотам таблицы 1, принятым в качестве истинных, с сечением рельефа 0,25 м

В составленной программе фильтрации заданных высоких частот (остаются только низкие частоты) *Sub МодФилВысЧ()* высоты Z представлены массивом $cc1()$. Массив этих же высот, отягощенных случайными ошибками, в данной программе обозначен через $cm()$. В программе они представляют модель рельефа, которая будет описываться рядами Фурье и на которой исследуется эффективность фильтрации шумов (случайных ошибок высот). Связь настоящих массивов определяется формулой

$$cm(i) = cc1(i) + delta, \quad (20)$$

где i изменяется от 0 до $N - 1$,

$$delta = Randbetween(-t, +t) \cdot Std, \quad (21)$$

а функция языка VBE генерирования случайного числа в интервале значений квантиля от $-t$ до $+t$; Std – задаваемый стандарт случайных ошибок (шумов).

Исследование эффективности фильтрации осуществляется циклом изменения параметра фильтра от значений $F1$ до $N+2$. Значение $F1$ может приниматься произвольным, но в данной исследовательской программе оно принято равным двум с тем, чтобы исследовать эффективность фильтрации на всех гармониках.

Значение среднего квадратического отклонения Sko , характеризующего эффективность фильтрации, вычисляется по формуле

$$Sko = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (cm1(i) - cc1(i))^2}{N}}, \quad (22)$$

где $cm1(i)$ – i -тый элемент массива, отфильтрованного (восстановленного) сигнала.

Эффективность фильтрации оценивалась по минимальным значениям Sko .

Например, при $N = 15$, $Std = 0,3$ м и данным таблицы 1 получены следующие моделированные по формуле (20) значения случайных ошибок и высот, приведенные в таблице 2. Здесь значения высот найдены как сумма истинных высот, приведенных в таблице 1, и случайных ошибок таблицы 2.

Таблица 2. – Моделированные значения случайных ошибок и высот

Номер точек	Высота, м	Случайная ошибка
1	104,42	0,9
2	104,11	0,3
3	104,66	0,9
4	102,74	-0,9
5	102,24	0,0
6	103,51	0,0
7	104,41	0,3
8	106,11	0,0
9	103,81	-0,3
10	103,45	0,0
11	102,63	0,0
12	102,63	-0,6
13	103,83	-0,3
14	104,92	0,6
15	103,45	0,0

Высотам таблицы 2 соответствует массив $cm(i)$ исследовательской программы.

В таблице 3 приведены средние квадратические отклонения (22) по каждому фильтру и при различных значениях параметра точности Std .

Таблица 3. – Средние квадратические отклонения Sko по каждому фильтру в метрах в зависимости от стандартов Std распределения случайных ошибок высот

Гармоники	F1	Значения Std				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0	2	0,833138	0,839700	0,833138	0,833324	0,910034
1	3	0,826894	0,832564	0,825931	0,851096	0,945270
2	4	0,680786	0,686109	0,680398	0,875126	0,821394
3	5	0,405096	0,423988	0,408310	0,705958	0,624400
4	6	0,404258	0,426542	0,421105	0,725719	0,624152
5	7	0,403558	0,430582	0,419046	0,728568	0,622929
6	8	0,381967	0,465022	0,412499	0,770333	0,773699
7	9	0,319604	0,403263	0,428946	0,738055	0,743841
8	10	0,289355	0,375102	0,567903	0,729367	0,728843
9	11	0,286904	0,380272	0,579253	0,730186	0,727725
10	12	0,277077	0,372638	0,593035	0,757414	0,765087
11	13	0,273641	0,396876	0,603354	0,790928	0,782243
12	14	0,235953	0,375108	0,586672	0,841022	0,848991
13	15	0,222214	0,363145	0,574015	0,867669	0,867067
14	16	0,180739	0,406612	0,584808	0,857904	0,885061

Из данных таблицы 3 следует, что восстановление рельефа рядом Фурье с максимальной точностью достигается в интервале между 1 и 15 гармониками. При этом чем больше ошибки исходных данных (больше величина Std), тем меньше число гармоник требуется, чтобы хранить данные в памяти компьютера с последующим восстановлением рельефа. Так, при стандарте высот 0,5 м средняя квадра-

тическая ошибка восстановления рельефа будет минимальной при использовании лишь пяти гармоник и составит 0,624 м (в таблице 3 приведены результаты фильтрации, начиная с первой гармоники $F1 = 2$). Отсюда следует, что для повышения эффективности (достижения максимальной точности) представления рельефа при определении числа гармоник необходимо исходить из точности определения высот как математической основы рельефа. Чем менее точны высоты, тем меньшее число гармоник необходимо для их хранения в памяти компьютера. На рисунке 2 представлен рельеф, полученный при использовании лишь 3-х гармоник ряда Фурье из 15-ти при значении $Std = 0,3$ м. На рисунке 3 представлен моделированный при тех же случайных ошибках (восстановленный по всем 15 гармоникам) рельеф, соответствующий высотам таблицы 2.

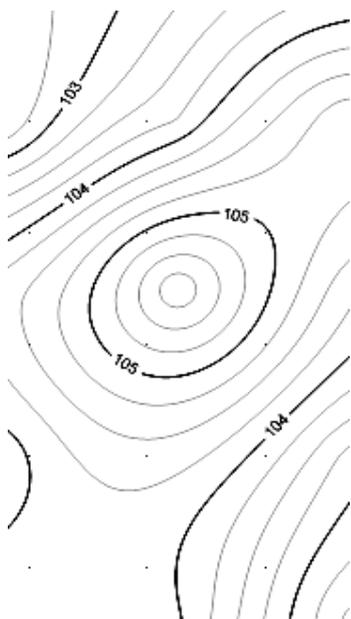


Рисунок 2. – Отфильтрованный рельеф, полученный при использовании лишь 3-х гармоник ряда Фурье из 15 при значении $Std = 0,3$ м

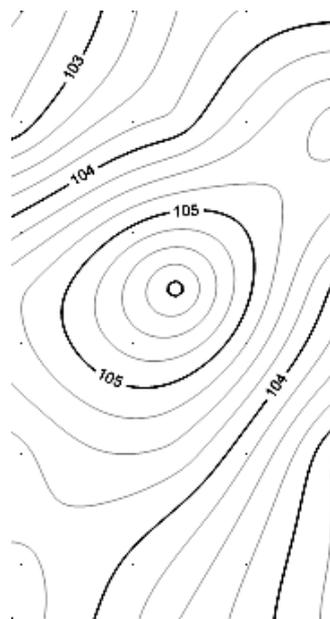


Рисунок 3. – Моделированный (восстановленный без фильтрации по всем 15-ти гармоникам) рельеф, соответствующий высотам таблицы 2

Не только по минимальному значению Sko , но и визуально видна большая близость рельефа, полученного по 3-м гармоникам, к принятому за истинный (см. рисунок 1), чем рельефа, отягощенного случайными ошибками (рисунок 3) и получаемого при полном числе гармоник. Таким образом, доказывается возможность сокращения числа гармоник в рядах Фурье и повышения точности восстановления рельефа, отягощенного случайными ошибками.

Покажем влияние и систематической части ошибок самого метода Фурье. В таблице 4 приведены средние квадратические отклонения (22) по каждому фильтру, полученные при нулевых значениях средних квадратических ошибок высот рельефа. То есть моделированные высоты здесь принимались всегда равными приведенным в таблице 1. Соответствующее графическое представление рельефа при использовании всех 15-ти гармоник соответствует рисунку 1.

Таблица 4. – Средние квадратические отклонения по каждому фильтру при высотах, не отягощенных случайными ошибками

Номер гармоники	Sko	Номер гармоники	Sko
0	0,832	8	0,251
1	0,825	9	0,247
2	0,677	10	0,234
3	0,3999	11	0,230
4	0,398	12	0,182
5	0,396	13	0,129
6	0,374	14	0
7	0,292		

Данными таблицы 4 характеризуется внутренняя точность самого метода Фурье. Здесь значения средних квадратических ошибок (СКО) представления рельефа рядом Фурье вычислены по формуле (22),

где $cm1(i)$ – массив отфильтрованных значений истинных высот, а $cc1(i)$ – сами значения истинных высот, приведенные в таблице 1. На практике при таком тестировании модели вместо истинных высот следует принять реальные. Из сравнения таблиц 3 и 4 можно сделать вывод, что число гармоник для хранения информации о рельефе необходимо устанавливать из условия равенства средней квадратической ошибки высот среднему квадратическому отклонению, рассчитанному (см. таблицу 4) по каждому фильтру при истинных или одних и тех же реальных высотах.

Таким образом, методика расчета числа гармоник хранения высот и соответственно восстановления рельефа может быть следующей:

1) задаемся средней квадратической ошибкой Std известных высот рельефа. На практике такая величина известна всегда, так как способы оценки точности полученного при съемке рельефа общеизвестны;

2) сравниваем значение Std с предвычисленными для каждой фильтрующей гармоники значениями средних квадратических отклонений (см. таблицу 4) с использованием реальных высот. Из равенства этих значений определяем число гармоник. Например, значение $Std = 0,1$ м, исходя из таблицы 4, находится в интервале от 0 до 0,129 м. Следовательно, для хранения высот рельефа заданной точности необходимо использовать полный ряд Фурье со всеми гармониками. При $Std = 0,2$ м, попадающему в интервал от 0 до 0,230 (см. таблицу 4), можно ограничиться 12-ю гармониками (при их счете от 0). Аналогично при $Std = 0,3$ м (интервал от 0 до 0,374 (см. таблицу 4)) – 7-ю гармониками, при $Std = 0,4$ м (интервал от 0 до 0,677 (см. таблицу 4)) – 3-мя гармониками, и при $Std = 0,5$ м – тоже 3-мя гармониками.

В таблице 3 выделены минимальные средние квадратические отклонения Sko из моделирования по каждому фильтру в зависимости от стандартов Std распределения случайных ошибок высот. Эти значения Sko соответствуют числу гармоник, получаемому из сформулированного выше правила равенства средней квадратической ошибки высот Std среднему квадратическому отклонению, рассчитанному по каждому фильтру при истинных или одних и тех же реальных высотах. Несовпадение для случая, когда Std равен 0,3 м, несущественно, так как при 7-ми гармониках среднее квадратическое отклонение равно 0,428946 и пренебрежимо мало отличается от значения 0,40831 при 3-х гармониках.

Таким образом, из сказанного выше следует вывод, что ряды Фурье позволяют как фильтровать случайные ошибки описываемых ими данных, так и сокращать объем информации о них без понижения точности конечных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпаара, Д. Точное сельское хозяйство (Precision agriculture) / Д. Шпаара, А. Захаренко, В. Якушева ; под ред. Д. Шпаара. – СПб. ; Пушкин, 2009. – 398 с.
2. Фрейзер, М. Введение в вейвлеты в свете линейной алгебры / М. Фрейзер ; пер. с англ. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний. 2008. – 487 с.
3. Пискунов, Н.С. Дифференциальные и интегральные исчисления для вузов / Н.С. Пискунов. Т. 2. – М. : Наука, 1978. – 575 с.
4. Мазурова, Е.М. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье / Е.М. Мазурова // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 3. – С. 18–35.
5. Мазурова, Е.М. Двумерное и матричное представление быстрого преобразования Фурье / Е.М. Мазурова // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 4. – С. 3–12.
6. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Мала ; пер. с англ. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
7. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование, модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
8. Журкин, И.Г. Автоматизированная обработка данных дистанционного зондирования : учеб. для вузов / И.Г. Журкин, Н.К. Шавенько ; под общ. ред. И.Г. Журкина. – М. : Диона, 2013. – 456 с.

Поступила 21.12.2018

APPLICATION OF FOURIER SERIES IN GEOINFORMATION FILTERING

A. YARMOLENKO, O. SKOBENKO

Foundations of Fourier transforms theory in a matrix form referring to programming are described. Using special programs written in Visual Basic Excel (VBE) the effectiveness of noise-filtering based on Fourier transforms is investigated. Ability to filter both random error and compression of geo-information is shown. Provides the ability to filter both random error and compression of geoinformation.

Keywords: filtering, Fourier series random errors, geoinformation.

УДК 528.7

АЭРОСЪЕМКА С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

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

Рассматривается возможность использования снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата MAVIC PRO с цифровой камерой FC-220, для задач картографирования. Работа выполнена на примере съемки учебного корпуса № 3 Полоцкого государственного университета. Представлен расчет количества снимков и угла засечки в зависимости от проектируемых параметров аэросъемки. Показано, что в случае, когда короткая сторона снимка расположена вдоль маршрута, будет ниже точность окончательных результатов, но и меньшее количество полученных снимков. Обработка данных произведена в программном комплексе Agisoft Photoscan. Выполнен анализ полученных угловых элементов внешнего ориентирования снимков. Рассмотрены особенности выбора и использования систем координат в данном программном продукте. Акцентировано внимание на несоответствие терминологии, используемой разработчиками Agisoft Photoscan, с общепринятой в навигации, фотограмметрии и других отраслях геодезического производства.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аэросъемка, цифровая камера, курс, крен, тангаж, перекрытие.

При выполнении аэрофотосъемки с пилотируемых самолетов создается технический проект на производство работ, где указываются: объем работ; масштаб фотографирования; тип аэрофотоаппарата; наличие вспомогательных приборов; технические условия, предъявляемые к аэрофотоснимкам и др. [1].

Исходными данными служат: географическое размещение объекта; тип воздушного судна; высота фотографирования [1]. При этом маршруты планируют с продольным перекрытием (вдоль маршрута) порядка 60%, а между маршрутами – 20...30% [2; 3].

В зависимости от принятых величин продольного и поперечного перекрытий рассчитывают базис фотографирования B_X и расстояние между маршрутами аэросъемки B_Y по формулам [1; 3]:

$$B_X = \frac{l_x m (100 - p) \%}{100\%}; \quad B_Y = \frac{l_y m (100 - q) \%}{100\%}. \quad (1)$$

Здесь l_x, l_y – протяженность кадра вдоль и поперек маршрутов соответственно; m – знаменатель масштаба съемки; p, q – продольное и поперечное перекрытия соответственно.

Число снимков в маршруте $n_{сн}$ и число маршрутов n_m рассчитываются по формулам [4]:

$$n_{сн} = \frac{D_X}{B_X} + n_3; \quad n_m = \frac{D_Y}{B_Y} + n_3, \quad (2)$$

где D_X, D_Y – длина и ширина участка съемки соответственно; n_3 – число зарамочных снимков или маршрутов ($n_3 = 2, 3, 4$).

Зарамочные снимки необходимы для обеспечения границ участка съемки или объекта и, как правило, задаются заказчиком.

Рассчитанные базис фотографирования B_X и расстояния между маршрутами B_Y наносят на полетную карту, масштаб которой примерно в 5...10 раз мельче масштаба аэросъемки [4]. Первый маршрут совмещают с границей снимаемого участка (объекта). Также намечают ориентиры, через которые самолет должен пролететь [4].

В воздухе до начала съемки определяют силу и направление ветра, в соответствии с которыми устанавливают курс и путевую скорость самолета. Так как сила и направление ветра в ходе съемки могут изменяться, периодически уточняют как направление ветра, так и курс, определяют снос самолета и вычисляют угол упреждения. Разворачивают самолет на угол упреждения, чтобы полет осуществлялся по линии заданного пути. В ходе аэросъемки постоянно проверяют путевую скорость самолета и контролируют правильность прокладки маршрутов.

Применение пилотируемой авиации для аэрофотосъемки и лазерного сканирования требует много времени и больших затрат, поэтому оно нерентабельно на малых территориях [2; 5]. Для создания топографических планов и решения различных инженерных задач на небольших территориях сегодня используют мобильные комплексы беспилотной аэрофотосъемки, так как в этом случае значительно сокращается стоимость выполнения работ [5].

На предварительном этапе аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) также рассчитываются [2; 5]: высота полета, расстояние между соседними маршрутами, протяженность маршрутов и время полета по маршрутам. Созданное полетное задание записывается в автопилот БПЛА, а контроль его выполнения ведется в специальном программном обеспечении, отображающем текущие характеристики полета: скорость, высоту и направление движения, сопротивление ветра, заряд аккумулятора [2; 5]. Программное обеспечение для автопилотирования используют на большинстве беспилотных летательных аппаратах самолетного типа. Используемые в работе дрон MAVIC PRO и цифровая камера FC-220 созданы для любительских целей, и автопилот на нем выполняет только функции возврата в исходную точку при разрядке аккумулятора и при завершении времени полета.

Аэрофотосъемка с БПЛА выполняется с высоты до 700 метров с помощью цифровой фотокамеры, имеющей 10...24 МП матрицу и объектив с фокусным расстоянием f до 50 мм [5]. При этом число сделанных снимков значительно больше в сравнении с использованием специализированных аэрокамер, так как формат кадра значительно меньше, чем у профессиональных цифровых камер и БПЛА ведет себя нестабильно, поэтому приходится увеличивать процент перекрытий.

По завершении полета на цифровую фотограмметрическую станцию считывается полученный массив данных, содержащий аэрофотоснимки с информацией об угловых движениях летательного аппарата (крен, тангаж, рысканье) и его геодезических координатах (широта, долгота, высота) в момент фотографирования [2].

Как отмечают авторы работ [2; 6] с беспилотного аппарата сложно выдержать как продольное перекрытие, так и поперечное. Автор работы [6] считает, что продольное перекрытие снимков должно составлять 80...90%, чтобы в покрытии не было дыр в результате «болтанки» самолета в воздухе. Однако, по его мнению, в этом случае увеличивается число стереопар с одной (при продольном перекрытии 60%) до шести, что потребует значительно больше времени для обработки. Кроме того, минимальный угол засечки может составлять до 9° , что снизит результирующую точность.

Для беспилотных летательных аппаратов авторы работ [2; 6] рекомендуют выполнять съемку с продольным перекрытием $p = 80\%$ и поперечным $q = 40\%$. Мы разделяем мнение указанных авторов, так как полет БПЛА неустойчив, на него оказывают сильное влияние порывы ветра, турбулентность и другие факторы [2; 5]. Такие перекрытия позволят исключить фотограмметрические разрывы.

Снимки цифровых камер имеют прямоугольную форму. В работе [2] рекомендуют располагать камеру так, чтобы длинная сторона снимка размещалась поперек полета, что позволяет снять большую площадь при той же длине маршрутов. Но в этом случае уменьшается базис фотографирования и, следовательно, отношение базиса фотографирования B к высоте съемки H , что приведет к снижению точности определения отметок точек местности.

Дальнейшие расчеты произведем для выполненной нами съемки учебного корпуса № 3 Полоцкого государственного университета с БПЛА MAVIC PRO цифровой камерой FC-220 с фокусным расстоянием $f = 4,73$ мм [7] и матрицей в 12 МП (3000×4000) [8] с линейным размером одного пикселя $l = 1,3858$ мкм [9].

Рассчитаем отношение базиса фотографирования к высоте съемки B/H , когда длинная сторона снимка расположена поперек маршрута и вдоль маршрута. Приняв продольное перекрытие $p = 70\%$ и 80% , рассчитаем базис фотографирования B_x по формуле (1) и отношение B/H для случаев, когда длинная сторона снимка l_x и его короткая l_y расположены вдоль маршрута для масштаба съемки 1: $m - 1:11000$. Результаты приведены в таблице 1. При расположении длинной стороны снимка вдоль маршрута точность определения высот будет выше примерно в 1,4 раза, а увеличение процента перекрытия с 70 до 80% снизит точность определения высот более чем в полтора раза [10]. При продольном перекрытии 90% углы засечки будут менее 9° , о чем справедливо говорится в работе [6].

Таблица 1. – Расчет базиса фотографирования B_x , отношения B/H и угла засечки γ

$m, P\%$	$H, \text{ м}$	$l_x, \text{ мм}$	$B_x, \text{ м}$	B/H	$\gamma,^\circ$
11000 70%	52	5,5432	18,29	0,35	19,4
		4,1574	13,72	0,26	14,8
11000 80%	52	5,5432	12,20	0,23	13,2
		4,1574	9,15	0,18	10,0

Предположим, что необходимо выполнить аэрофотосъемку территории длиной $X = 200$ м и шириной $Y = 45$ м с продольным перекрытием $p = 70$ и 80% и поперечным перекрытием $q = 40\%$. Рассчитаем по формулам (1) и (2) число снимков в проекте $N = n_{\text{сн}} \cdot n_{\text{м}}$ при высоте полета $H = 52$ м. Число зарамочных снимков в маршруте n_3 примем равным трем, зарамочный маршрут – один. Значения базисов фотографирования возьмем из таблицы 1. Результаты расчета приведем в таблице 2.

Таблица 2. – Расчет числа снимков

m	l_y , мм	B_y , м	$n_{сн}$	n_m	N
11000	5,5432	36,59	14/19	3	42/60
	4,1574	27,44	18/25	3	54/75

В таблице 2 число снимков в маршруте $n_{сн}$ и общее число снимков N приведены через дробь, где в числителе для продольного перекрытия $p = 70\%$, а в знаменателе – для продольного перекрытия $p = 80\%$. То есть число снимков при продольном перекрытии 80% увеличилось почти на 36%, а при использовании короткой стороны поперек маршрута число снимков возросло на 39%. Пользователям придется выбирать либо выше точность и большее число снимков, либо точность ниже, но меньшее число снимков.

В ходе аэросъемки корпуса № 3 Полоцкого университета получено 62 снимка. Длинная сторона матрицы располагалась вдоль маршрута. Максимальный базис $B_x = 20,78$ м, минимальный – 3,97 м. Проекция длинной стороны кадра на местность составила 60,975 м, короткой стороны – 45,73 м. Произведено 4 маршрута съемки. Минимальное продольное перекрытие 62,7%, максимальное – 92,9%. Минимальное поперечное перекрытие 43,2%, максимальное – 72,8%. Непараллельность маршрутов составила от 0 до 1,12°. Прогиб первого маршрута – 3,6%, что можно считать приемлемым для беспилотных летательных аппаратов. «Елочка» доходила до 10°.

Снимки первого маршрута были смонтированы в накидной монтаж, которые подтвердили приведенные выше значения.

Для обеспечения заданного процента продольного перекрытия необходимо вычислить интервал фотографирования τ по следующей формуле [3]:

$$\tau = \frac{B_x}{W}, \quad (3)$$

где W – путевая скорость летательного аппарата.

Путевая скорость W составила 2,4 км/ч (0,667 м/с). Аэросъемка выполнялась в безветренную погоду. Расчетный интервал фотографирования τ – 18,3 с. Для расчета интервала фотографирования базис фотографирования B_x принят по данным таблицы 1 при продольном перекрытии 80%. Вычисленный интервал устанавливают на командный прибор, который автоматически выполняет съемку (если есть такая возможность) или через рассчитанный интервал дают команду на съемку с пульта. В нашем случае экспонирование выполнялось вручную с пульта дистанционного управления, а не через рассчитанный интервал фотографирования, так как программное обеспечение дрона не позволяло задавать автоматический интервал фотографирования. Схема маршрутов и расположение центров фотографирования на маршрутах показаны на рисунке 1.

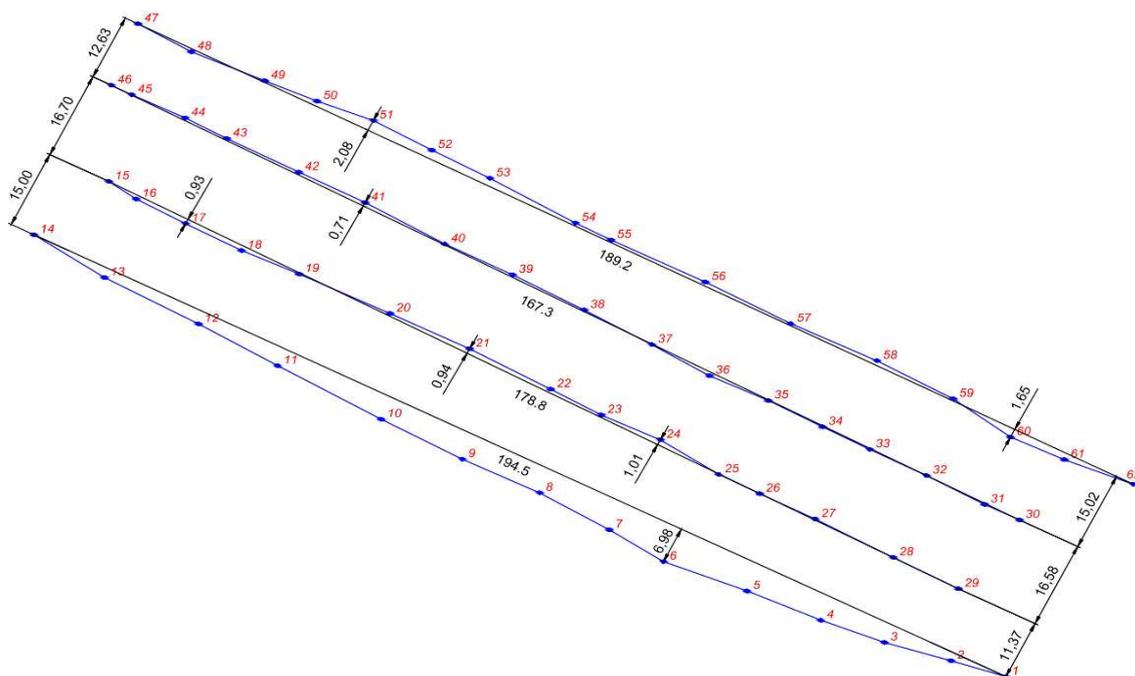


Рисунок 1. – Схема маршрутов

Обработка данных производилась в программном продукте Agisoft Photoscan. После уравнивания в Agisoft Photoscan для пользователя имеется возможность посмотреть углы поворота: либо курс, тангаж и крен для каждого снимка, либо продольный угол наклона ϕ , поперечный угол наклона ω и угол разворота снимка в своей плоскости κ .

Курсом самолета называют угол между северным направлением истинного или магнитного меридиана, отсчитанный по ходу часовой стрелки до продольной оси самолета от 0 до 360°. Если угол определяется от магнитного меридиана, курс называется магнитным, если от истинного – истинным курсом [3].

В нашем случае использовался магнитометр, следовательно, определялся магнитный курс.

В руководстве пользователя [7] представлена информация о курсе самолета. Однако расчеты показывают, что термин «курс», используемый разработчиками программного продукта, отличается от общепринятого. Выясним, какой угол разработчики называют курсом.

Согласно [7], Agisoft Photoscan требует, чтобы в ходе аэросъемки координаты центров фотографирования были определены по данным GPS-приемника, который определяет их в системе координат WGS-84. Чтобы перейти в систему координат WGS-84, опорные точки нами были заданы в системе координат СК-42. Параметры связи этих систем координат известны. Система координат СК-42 является левой. Расположение осей координат, параллельных системе координат СК-42 $X_{СК}$ и $Y_{СК}$, показано на рисунке 2.

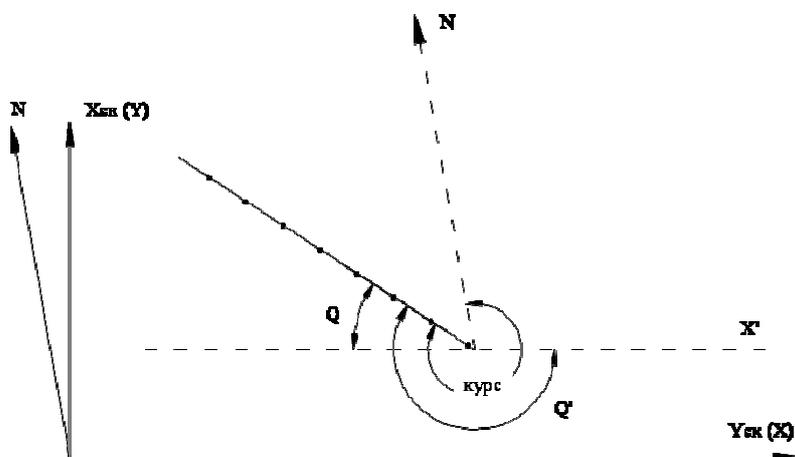
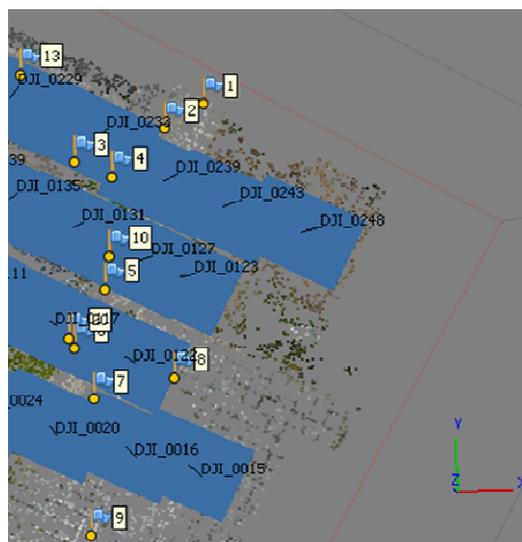


Рисунок 2. – Направление полета относительно принятой системы координат

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: N – направление на север магнитный; (X) и (Y) – принятые разработчиками программы направления осей координат; θ – угол, который выдает программа и который никоим образом не является курсом – это угол относительно принятой разработчиками программы Agisoft Photoscan системы координат, что подтверждает рисунок 3, созданный по результатам обработки.



X – восточное указание; Y – северное указание; Z – высота

Рисунок 3. – Фрагмент графического окна Agisoft Photoscan

Как видим, авторы программы Agisoft Photoscan поменяли оси X и Y местами, возможно, вследствие того, что в фотограмметрии используются правые системы координат и нет необходимости пересчитывать в левую СК. Однако возможно и допустить ошибку, так как в каталогах заданы координаты в системе координат Гаусса – Крюгера, которая является левой системой координат.

В любом случае необходимо было в руководстве пользователя [7] указать, как перейти в принятую ими систему координат, когда пользователи имеют другие системы координат.

Топографические карты в нашей стране и других странах созданы в поперечно-цилиндрической проекции Гаусса – Крюгера. Цилиндрические проекции подразделяются на нормальные, поперечные и косые в зависимости от взаимного расположения оси вращения сфероид (Земли) и оси цилиндра на который проецируется местность. В нормальной цилиндрической проекции ось цилиндра совпадает с осью вращения Земли; в поперечно-цилиндрической проекции ось цилиндра перпендикулярна оси вращения Земли; в косой – ось цилиндра составляет некоторый угол с осью вращения Земли [11]. Проекция Меркатора не является поперечно-цилиндрической, это нормальная цилиндрическая проекция. Меркатор жил в XVI веке. Возможно, так назвали проекцию в память о выдающемся картографе и разработчике цилиндрической проекции. Поперечную цилиндрическую проекцию впервые описал Ламберт в 1772 году [14]. В 1822 году эту проекцию описал Гаусс и математик Крюгер, откуда и произошло название «проекция Гаусса – Крюгера» [14]. В 1903 году в косой картографической проекции впервые создана карта Швейцарии [14]. В XIX веке шведский священник Джеймс Галл использовал секущий цилиндр. Эта проекция носит название проекции Галла [14].

Многими национальными и картографическими организациями применяется проекция UTM (Universal Transverse Mercator) – универсальная поперечная проекция Меркатора [12]. В проекции UTM, как и в проекции Гаусса – Крюгера, применяют 6-градусные зоны, но отсчет зон ведется от 180° долготы, а не от Гринвичского меридиана, как в проекции Гаусса – Крюгера. В проекции Гаусса – Крюгера частный масштаб на осевом меридиане $m_0 = 1$, а в проекции UTM $m_0 = 1$ на линиях, параллельных осевому меридиану, как показано на рисунке 4, т.е. проецирование ведется на секущий цилиндр.

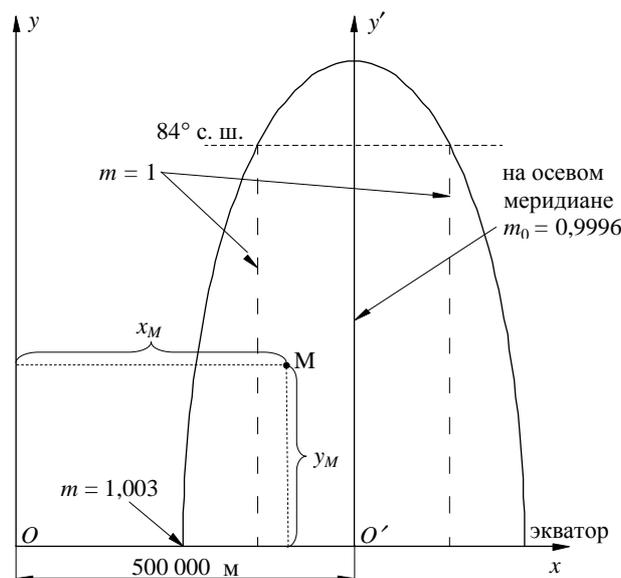


Рисунок 4. – система координат UTM

Как видим, в проекции UTM используется правая система координат, возможно, поэтому разработчики программы Agisoft Photoscan используют именно эту систему координат, но об этом нигде не сказано. Иногда в интерфейсе программы, чтобы не допустить ошибку, координаты обозначают N, E (Север, Восток), как показано на рисунке 5.

Маркеры	Восточное указание (м)	Северное указание (м)
<input type="checkbox"/> 1	5604189.476000	6157389.832000
<input checked="" type="checkbox"/> 2	5604182.070000	6157385.399000
<input type="checkbox"/> 3	5604165.179000	6157379.450000
<input type="checkbox"/> 4	5604172.006000	6157376.505000

Рисунок 5. – Представление координат в Agisoft Photoscan

В России проекция Гаусса – Крюгера разработана применительно к эллипсоиду Красовского. Проекция UTM разработана в США [12]. В настоящее время в основе системы лежит эллипсоид WGS-84 [13]. WGS-84 (World Geodetic System 1984) – глобальная система геодезических параметров Земли, принятая на момент 1984 года с целью геодезического обеспечения ориентиров в мировом пространстве; WGS-84 используется в системе спутниковой навигации GPS-84 [13]. Возможно, поэтому в Agisoft Photoscan принята правая система координат.

Как отмечают авторы работы [2], на борт БПЛА устанавливают дешевые GPS-приемники, точность определения координат центров проекции в этом случае составляет 20...30 м. Использование только координат центров фотографирования, полученных по данным GPS, приведет к снижению точности окончательных результатов.

Авторы работ [2; 15] вместо термина «курс» используют термин «рыскание». Авторы работы [16] отмечают, что «рыскание» – это небольшие угловые движения летательного аппарата относительно вертикальной оси. В работе [17] отмечается, что угол «рыскание» сходен с курсом, но отсчитывается относительно выбранной системы координат. Термин «рыскание», упоминаемый в работах [2; 15], более применим вместо термина «курс». Понятия крен, тангаж и курс связаны с самолетом. Судя по текстам [2; 15], при помощи гироскопа определяются углы крена, тангажа и рыскания. А так как цифровая камера жестко связана с беспилотником, то в какой-то мере углы крена, тангажа и рыскания будут отражать продольные и поперечные углы наклона снимка и его угол разворота.

По результатам уравнивания программа выдает углы курса, тангажа и крена на объект съемки. На рассматриваемом объекте так называемый «курс» колеблется от 27,33 до 30,88° и от 209,21 до 210,94° в зависимости от направления полета; тангаж – от 2,46 до 3,62°; значения крена изменяются от –0,14 до 0,39°. Расхождения углов по курсу составили от 3,55 до 1,73° в зависимости от направления полета; по тангажу – 1,18°; по крену – 0,53°.

Можно вместо курса, тангажа и крена вывести на экран углы φ , ω и κ , но они находятся в диапазоне ω от +3,26° до –3,01°; φ – от –1,68 до +1,54°; κ – от –29,48 до –25,92° и от 150,54 до 152,19°.

Угол φ идентичен тангажу, угол ω идентичен крену, угол κ почему-то идентичен курсу. $\Delta\varphi = 3,22^\circ$ $\Delta\omega = 6,27^\circ$ и $\Delta\kappa = 180,02^\circ$ и $\Delta\kappa = 178,11^\circ$, где Δ – разности углов.

Как видим, получены значительные расхождения между углами курса, тангажа и крена, а также продольным φ , поперечным ω и углом разворота снимков κ . Возможно, что оптическая ось фотокамеры была установлена не перпендикулярно системе координат БПЛА, имели место установочные ошибки, но почему-то в ходе уравнивания расхождения углов оказались разные.

Углы для первых восьми снимков, а также их разности, полученные вычитанием от углов последующего снимка углов предыдущего, приведены в таблицах 3 и 4. Разности углов должны быть свободны от систематических ошибок.

Таблица 3. – Углы φ , ω , κ и разности углов, в градусах

№ снимка	φ	$\Delta\varphi$	ω	$\Delta\omega$	κ	$\Delta\kappa$
1	–1,561		3,189		–25,929	
2	–1,598	–0,037	3,126	–0,062	–26,112	–0,182
3	–1,685	–0,087	3,064	–0,062	–26,414	–0,302
4	–1,510	+0,175	2,947	–0,117	–27,479	–1,065
5	–1,625	–0,115	2,841	–0,106	–28,225	–0,746
6	–1,621	+0,004	2,955	+0,114	–28,104	0,121
7	–1,485	+0,136	2,993	+0,038	–28,416	–0,312
8	–1,253	+0,232	2,510	–0,483	–28,750	–0,334

Таблица 4. – Углы тангаж, крен и курс и разности углов, в градусах

№ снимка	Тангаж	Разность	Крен	Разность	Курс	Разность
1	3,550		–0,008		27,332	
2	3,510	–0,040	–0,057	–0,050	27,513	0,181
3	3,494	–0,016	–0,145	–0,043	27,815	0,131
4	3,311	–0,183	0,022	0,167	28,879	1,064
5	3,271	–0,039	–0,087	–0,109	29,622	0,743
6	3,370	0,099	–0,037	0,050	29,503	–0,118
7	3,339	–0,031	0,0120	0,157	29,817	0,313
8	2,803	–0,0536	0,109	0,011	30,139	0,322

Анализ данных таблиц 3 и 4 показал, что углы значительно отличаются между собой, свидетельствуя тем самым о систематических ошибках установки оптической оси фотокамеры относительно системы координат дрона.

Для сопоставления углов φ , ω и κ с углами тангажа, крена и курса определим взаимные углы между снимками, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Сопоставление разностей углов в градусах

Точки	$\Delta\varphi$	Тангаж	Δ	$\Delta\omega$	Крен	Δ	$\Delta\kappa$	Курс	Δ
1...2	-0,037	-0,040	0,003	-0,062	-0,050	-0,012	-0,182	0,181	-0,363
2...3	-0,087	-0,016	-0,071	-0,062	-0,043	-0,019	-0,302	0,131	-0,433
3...4	0,175	-0,183	0,358	-0,117	0,167	0,284	-1,065	1,064	-2,129
4...5	-0,115	-0,039	-0,154	-0,106	-0,109	0,003	-0,746	0,743	-1,489
5...6	+0,004	0,099	-0,095	0,114	0,050	0,064	0,121	-0,118	0,239
6...7	+0,136	-0,031	0,167	0,038	0,157	-0,119	-0,312	0,313	0,625
7...8	+0,232	-0,536	0,768	-0,483	0,011	-0,494	-0,334	0,322	0,656

Как видим, разности углов $\Delta\varphi$ и тангажа, а также $\Delta\omega$ и крена не превышают 1° , а разности углов $\Delta\kappa$ и курса превышают 2° . Данные таблицы 5 свидетельствуют о значительных расхождениях. Причем уравнивание сети выполнялось по одним и тем же опорным и связующим точкам при одинаковом их количестве. Возможно, это объясняется тем, что углы тангажа, крена и рыскания определяют с точностью, превышающей 10° , и содержат систематические ошибки, что, по мнению автора работы [2], усложняет последующую обработку.

Разработчики Agisoft Photoscan утверждают, что программа отличается высокой степенью автоматизации выполняемых операций и не требует специальной квалификации для работы с ней – достаточно иметь общее представление о фотограмметрии.

Авторы работы [7] отмечают, что можно получить надежные результаты оператором без знания фотограмметрии и опыта обработки данных. Однако в руководстве пользователя Agisoft Photoscan и в открытом доступе нет алгоритма, в соответствии с которым создан данный программный продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэрофотосъемочные работы / А.А. Попов [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 200 с.
2. Сечин, А.Ю. Беспилотный летательный аппарат / А.Ю. Сечин, М.А. Дракин, А.С. Киселева. – М. : Ракурс. – 2011. – Часть 2 : Применение в целях аэросъемки для картографирования. – 12 с.
3. Савиных, В.П. Аэрокосмическая аэрофотосъемка / В.П. Савиных, А.С. Кучко, А.Ф. Стеценко. – М. : Картгеоцентр ; Геодезиздат, 1997. – 378 с.
4. Байков, Н.С. Самолетовождение при аэросъемке / Н.С. Байков, М.А. Трясучкин, В.А. Иванов – М. : Недра, 1973. – 232 с.
5. Коровин, Д.С. Обоснование и разработка метода оценки объема угольного склада на основе аэросъемки с применением беспилотных летательных аппаратов : дис. канд. техн. наук / Д.С. Коровин ; ФИЦ УУХ СО РАН. – Кемерово, 2017.
6. Рубцов, Н.Э. Обработка данных в программе UASMaster / Н.Э. Рубцов // Геоматика. – М., 2014. – № 1. – С. 34–44.
7. Agisoft Photoscan : рук. пользователя, 2016. – 113 с.
8. MAVIC PRO : рук. пользователя, 2017. – 60 с.
9. Михеева, А.А. Анализ разрешающей способности снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, П.Ф. Парадня // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 185–193.
10. Михеева, А.А. Анализ точности определения координат точек местности по снимкам, полученным аэрокамерой ADS-100 / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, Е.В. Лакотко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 16. – С. 162–171.
11. Вахромеева, Л.А. Картография / Л.А. Вахромеева. – М. : Недра, 1981.

12. Система координат UTM // Википедия : свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
13. Википедия: свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS 84](https://ru.wikipedia.org/wiki/WGS_84).
14. Ибанс, Рауль. Мечта об идеальной карте. Картография и математика [Электронный ресурс] / Рауль Ибанс. Т. 26. – Режим доступа: <https://librolife.ru/g4363610>.
15. Зинченко, О.Н. Беспилотный летательный аппарат : Применение в целях аэрофотосъемки для картографирования / О.Н. Зинченко. – М., 2011. – 12 с.
16. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Сов. энциклопедия, 1985. – 1600 с.
17. Рыскание // Википедия : свободная энцикл. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.

Поступила 20.12.2018

AERIAL PHOTO WITH A UNMANNED AIRCRAFT

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, P. PARADNYA

The paper considers possibility of using images obtained from an unmanned aerial vehicle MAVIC PRO with a digital camera FC-220 for mapping tasks. The study is based on the example of the shooting of educational building № 3 of Polotsk State University. The number of images and the angle of the serif are calculated depending on the projected parameters of aerial surveys. The paper shows that in the case when the short side of the image is located along the route, the accuracy of the final results is lower, but also the smaller number of images received. Data processing was performed in the Agisoft Photoscan software package. The article analyzes the obtained angular elements of exterior orientation of images. The features of the choice and use of coordinate systems in this software product are considered. The focus is on the inconsistency of the terminology used by the developers of Agisoft Photoscan, with the generally accepted terms in navigation, photogrammetry and other branches of geodetic production.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, digital camera, course line, roll, pitch, overlap.*

УДК 332.3.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ*канд. техн. наук П.Б. МИХНО**(Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Украина)*

Анализируется процесс освоения земель, нарушенных горнодобывающей деятельностью. Признаки завершенности, вариантности, функциональности, стадийности позволяют рассматривать технологический процесс использования нарушенных земель как отдельный жизненный цикл, который характеризуется необходимостью применения определенных мероприятий землеустройства и охраны земель. В жизненном цикле нарушенного земельного участка выделены три основные укрупненные стадии: проектная, функциональная, восстановительная. Разработаны диаграммы моделей жизненного цикла нарушенных земель при разных условиях разработки месторождений полезных ископаемых, отражающие «нулевой», «позитивный» и «негативный» сценарии. С помощью таких моделей можно комплексно анализировать и оценивать эффективность использования нарушенных горнодобывающим предприятием земель, что позволит разрабатывать специальные приемы, мероприятия и технологии для улучшения управления соответствующим процессом на территории отдельного горнодобывающего предприятия и в горнодобывающей отрасли в целом.

Ключевые слова: *полезные ископаемые, месторождение, процесс освоения, нарушенные земли, жизненный цикл, эффективность использования.*

Введение. Освоение нарушенных земель имеет некоторые специфические особенности, обусловленные характером их образования, использования и обязательностью восстановления. В целом соответствующий процесс длится от одного до десятков лет в зависимости от действия многих факторов, сопровождается корректировкой первоначальных задач (или постановкой новых) и трансформацией земель.

Научные исследования по оценке состояния нарушенных земель и эффективности рекультивации [1–6] отражают как негативные, так и позитивные последствия нарушения земель в процессе их производственного освоения, обработки и восстановления.

Общий признак научных работ [7; 8] по исследованию жизненных циклов различных систем и проектов – представление жизненного цикла в виде совокупности последовательных фаз, таких как: формирование (образование), рост (развитие), стабильность, завершение. Фазы состоят из совокупности логически взаимосвязанных работ, по окончании которых достигается определенный результат производственной деятельности [7].

В исследованиях по оценке неживимости жизненный цикл, как правило, отражается кривой линией, которая характеризует относительную эффективность эксплуатации исследуемого объекта на разных стадиях развития.

Каждый нарушенный земельный участок в своем развитии также проходит несколько последовательных этапов – от возникновения предпосылки нарушения и начала горнодобывающих работ до завершения рекультивации и передачи восстановленных земель землевладельцу (землепользователю).

Экосистемный подход к рекультивации [3] предусматривает получение в результате восстановления земель определенных экологических, экономических и социальных эффектов, которые формируют общую эффективность рекультивации как комплекса взаимосвязанных природоохранных мероприятий.

Попытка комплексной оценки процесса нарушения земель и его изменений во времени осуществлена в исследовании [9], в котором территория нарушенных земель характеризуется масштабом непосредственно нарушения, экологическим состоянием и полученной в результате ее использования суммарной величиной социально-экономической эффективности. В работе анализируется общий характер изменения этих показателей в течение жизненного цикла существования нарушенных земель. В то же время представленная временная диаграмма жизненного цикла отражает лишь одну условную ситуацию с негативными последствиями технологического освоения нарушенных земель. При этом не показаны другие возможные тенденции жизненного цикла нарушенных земель.

Основная часть. Специфика нарушенных земель определяется особенностями их образования. Технология и объемы горнодобывающей деятельности, связанной с добычей и перемещением на земную поверхность нефти, угля, руды и других полезных ископаемых, определяют основные характеристики нарушенного земельного участка как объекта неживимости. Образование нарушенных земель невозможно без повреждения земной поверхности, геологического строения и нанесения несоразмерного ущерба предыдущему целевому назначению, что является уникальной особенностью таких земель, так как полезность горного объекта формируется в результате нанесения вреда земельному участку сельскохозяйственного назначения и убытков землевладельцу, у которого она отчуждается для несельскохозяйствен-

ных нужд, в частности горнодобывающей деятельности. Таким образом, наличие месторождения полезных ископаемых, разработка которых технологически и экономически обоснована, априори определяет приоритетность промышленного освоения месторождений с обязательным негативным последствием в виде нарушения земель, в недрах которых эти месторождения залегают.

Моделирование жизненного цикла. В жизненном цикле нарушенного земельного участка можно выделить *три основные укрупненные стадии*: проектную (начальную); функциональную (формирования и развития); восстановительную.

На проектной стадии формулируются цели промышленного освоения месторождения полезных ископаемых, обосновывается социально-экономическая необходимость, экологическая допустимость горного объекта и потребности в земельных ресурсах, оценивается возможное или ожидаемое влияние. Выполняется выбор и технико-экономическое обоснование наилучшего варианта использования земельного участка, содержащего в недрах полезные ископаемые, среди юридически разрешенных, экологически обоснованных, технологически осуществимых и экономически целесообразных. Выбранный вариант использования отражается в техническом задании (технических условиях) на проектирование строительства, реконструкции или расширения горнодобывающего предприятия.

Также предварительно предусматриваются меры по восстановлению земель после завершения промышленного освоения месторождения. Принятые решения отражаются в плановой, проектной и сметной документации. Разрабатываются проекты строительства, реконструкции или расширения горнодобывающего предприятия, отвода, рекультивации земель.

Возможные реконструкция или расширение территории горнодобывающего предприятия вызваны истощением в определенный момент эксплуатационных возможностей удовлетворять потребности пользователя. Для горнодобывающего предприятия характерным при этом является изменение технологических схем добычи и переработки полезных ископаемых, а также увеличение территории путем аренды новых земельных участков для размещения новых отвалов с целью повышения экономической эффективности эксплуатации месторождения.

Стадия реализации проекта включает выполнение предусмотренных проектом работ и обуславливает практически полное изменение предыдущих характеристик земельного участка и окружающей среды. На этой стадии для возмещения расходов и инвестиций и получения прибыли земельный участок используется по новому целевому назначению.

На восстановительной стадии истощаются запасы полезных ископаемых, улучшения перестают обеспечивать прибыль предприятию и заканчивается период промышленного освоения месторождения. Жизненный цикл завершается после выполнения мероприятий рекультивации, ликвидации или перепрофилирования зданий, сооружений, технологического оборудования и внесения изменений в земельно-учетные документы.

Анализ моделей жизненного цикла нарушенных земель. На диаграммах (рисунки 1–3) моделей жизненного цикла нарушенных земель (карьеров, отвалов и хвостохранилищ, образованных в результате разработки горно-обогатительным комбинатом месторождения полезных ископаемых) линиями показаны возможные изменения степени нарушения земель и обусловленные этим нарушением изменения их экологического состояния и социально-экономической эффективности использования относительно условно начальных значений.

Положения соответствующих трендов рассмотрены за определенные промежутки времени, ограниченные такими факторами, как:

- t_0 – разработка градостроительной и землеустроительной документации по отводу земельного участка, развитию промышленной и инженерной инфраструктуры горного объекта и будущему использованию нарушенных земель (*проектная стадия*);

- t_1 – начало разработки месторождения, сопровождающееся нарушением земель вскрышными работами;

- t_2 – временная остановка горнодобывающих работ;

- t_3 – начало завершающей стадии разработки месторождения;

- t_4 – отработка нарушенных земель (*функциональная стадия*);

- t_5 – начало работ по горнотехнической рекультивации;

- t_6 – начало процедуры возврата технически рекультивированных земель землевладельцу;

- t_7 – начало биотехнологических работ по восстановлению плодородия;

- t_8 – завершение биологической рекультивации (*восстановительная стадия*).

Диаграмма «нулевого» варианта (рисунок 1) моделирует процесс приведения нарушенных земель после рекультивации в состояние, предшествовавшее нарушению земной поверхности и геологического строения. На момент времени t_0 (см. рисунок 1) нарушение земель отсутствует, при определенном качественном и экологическом состоянии земель наблюдается некоторая социально-экономическая эффективность их использования. Начальные значения указанных показателей условно равны.

После отвода земель для производственных нужд и до начала эксплуатации месторождения (t_1) нарушение отсутствует, экологическое состояние и социально-экономическая эффективность неизменны относительно начальных значений, и условно одинаковые, что отражено одной общей прямой линией.

За промежуток времени от t_1 до t_5 происходит развитие производственной деятельности, а именно: значительное расширение территории нарушенных земель, формирование отвалов и выработка полезного пространства карьера на глубину.

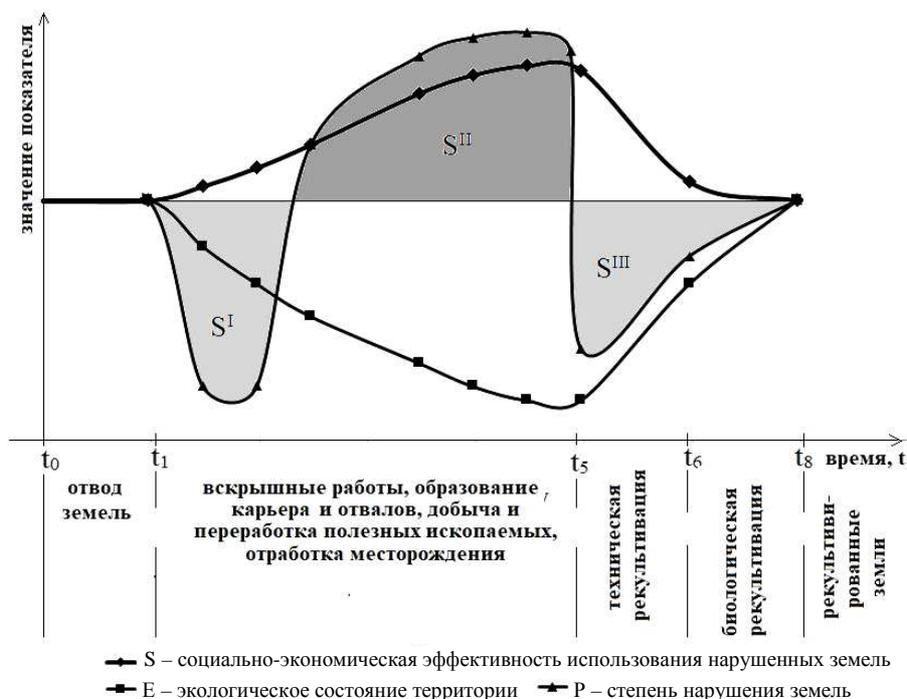


Рисунок 1. – Модель жизненного цикла нарушенных земель по «нулевому» варианту

Вскрышные работы характеризуются интенсивным ухудшением экологического состояния территории и практически полной потерей социально-экономической эффективности использования, сменяющейся стремительным ростом после начала добычи, переработки полезных ископаемых и реализации продукции.

Дальнейшая разработка месторождения сопровождается прогрессивным ухудшением экологического состояния территории. При этом происходит существенный рост социально-экономической эффективности (которая значительно превышает свое первоначальное значение), что объясняется развитием инженерной инфраструктуры, занятостью населения на производстве, иной социальной значимостью, а также прибылью от горнодобывающей и перерабатывающей деятельности промышленного предприятия.

Пример преимуществ для социальной сферы от крупномасштабной добычи полезных ископаемых – образование и развитие в Полтавской области города Комсомольска (ныне Горишние Плавни) для обслуживания Полтавского горно-обогатительного комбината.

На функциональной стадии исследуемые показатели достигают своих максимальных значений. После завершения промышленной эксплуатации карьера и прекращения добычи полезных ископаемых нарушенные земли становятся отработанными и требуют рекультивации. Со сворачиванием производственных процессов и полным завершением горнодобывающей деятельности наблюдается резкое снижение социально-экономической эффективности использования территории.

Благодаря горнотехнической рекультивации отработанных земель уменьшается степень нарушения, экологическое состояние территории существенно улучшается при сохранении практически неизменной социально-экономической эффективности ее использования. Поэтому необходимо концентрировать усилия и ресурсы для ускоренного завершения этого этапа рекультивации.

Окончательные характеристики экологического состояния и социально-экономической эффективности использования рекультивированных земель устанавливаются после биологической рекультивации, которая оканчивается на момент t_8 .

Интегральным отражением изменения социально-экономической эффективности использования нарушенных земель являются обозначенные на рисунках 1–3 области S^{II} (положительные социально-

экономические последствия от разработки месторождения полезных ископаемых горнодобывающим предприятием), S^I и S^{III} (негативные социально-экономические последствия нарушения земель).

Анализ жизненного цикла нарушенных земель крупных горнодобывающих предприятий по сценарию, изображенному на рисунке 1 ($S^{II} = S^I + S^{III}$), свидетельствует о том, что полностью восстановить нарушенные земли к их состоянию до нарушения почти невозможно вследствие глубинных геологических и гидрологических изменений самих земель, а также изменений экономических условий и социальной целесообразности использования.

По «негативному» варианту жизненный цикл временно прерывается (рисунок 2), сопровождается низкой рентабельностью, остаточными проявлениями нарушенности пострекультивационного состояния территории и худшим экологическим состоянием на окончание жизненного цикла относительно его начала.

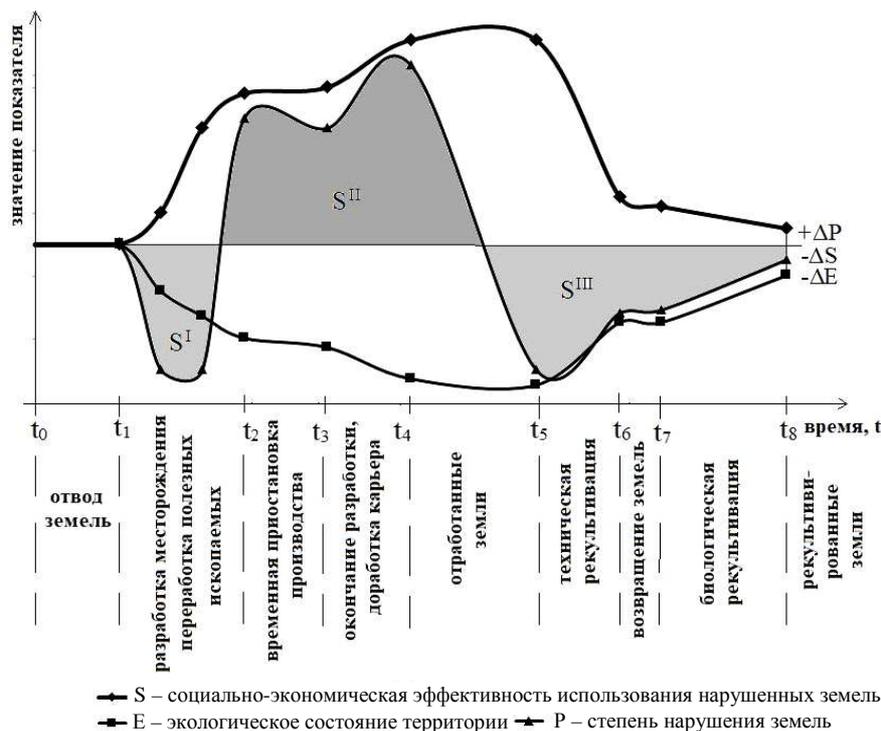


Рисунок 2. – Модель жизненного цикла нарушенных земель по «негативному» варианту

Преобразование качественных характеристик профиля образованных вследствие рекультивации рекультивированных земель относительно естественного состояния отведенных земель обозначено ΔP . Аналогично, изменения экологического состояния земель после завершения рекультивации обозначены ΔE , а изменения социально-экономической эффективности использования – ΔS . Если горнотехническая рекультивация совсем не осуществлялась во время разработки месторождения, то до ее начала наблюдается незначительное дальнейшее ухудшение экологического состояния нарушенных земель до наименьшего значения. Задержка во времени от t_4 до t_5 (увеличение продолжительности существования отработанных земель) ухудшает их экологическое состояние и дополнительно снижает социально-экономическую эффективность использования. Продолжительность жизненного цикла по «негативному варианту» может намного превышать проектную. За это время возможны изменения, не предусмотренные и не учтенные в проекте эксплуатации месторождения полезных ископаемых и технических условиях рекультивации. Могут быть разработаны новые генеральные планы, схемы планирования районов, социальные и инвестиционные проекты регионального развития с другим перспективным целевым использованием соответствующей территории. Возможное территориальное переподчинение нарушенных земель в процессе административно-территориальной реформы также может повлиять на их дальнейшее использование.

Положительный интегральный социально-экономический эффект от нарушения земель обеспечивается превышением конечного значения социально-экономического эффекта над его начальным значением (рисунок 3) при соблюдении соотношения $S^{II} > (S^I + S^{III})$.

Позитивный» (желательный) сценарий предполагает успешную реализацию проектов строительства и эксплуатации горно-обогатительного комбината, отвода земель и рекультивации при отсутствии

негативного влияния непредсказуемых факторов экологического, политического, экономического характера и необходимости затрачивать ресурсы на разработку и внедрение дополнительной проектной документации (или переработку уже существующей), а также переориентацию технологических схем добычи и переработки полезных ископаемых.

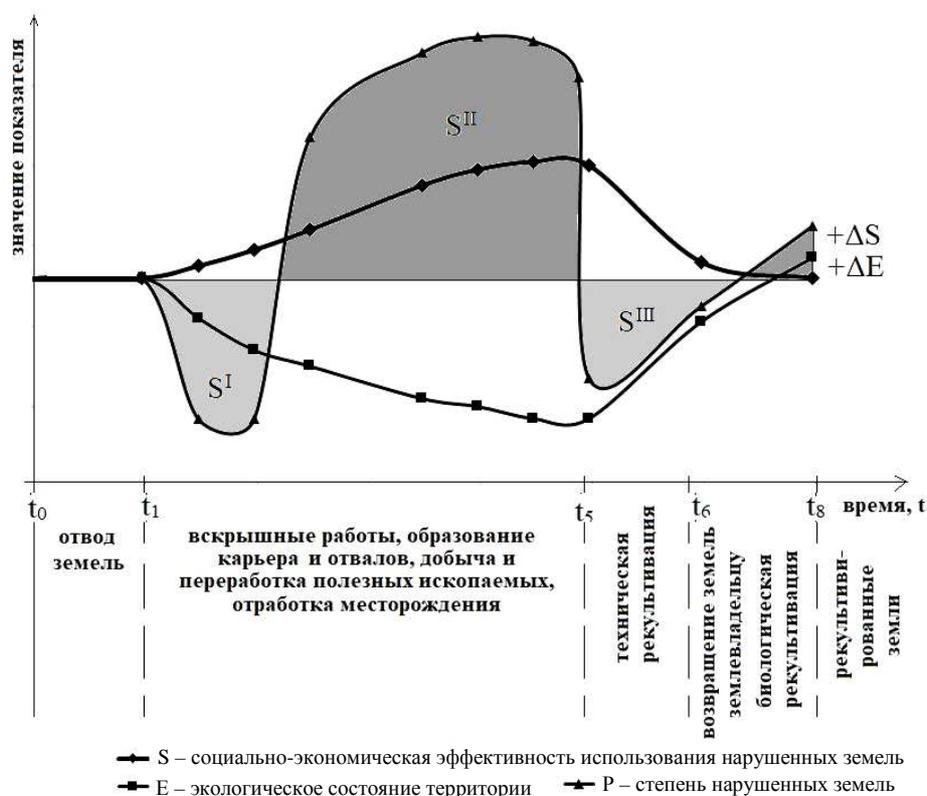


Рисунок 3. – Модель жизненного цикла нарушенных земель по «позитивному» варианту

В целом, затраты на рекультивацию должны повышать ценность земельного участка по сравнению с тем состоянием, в котором он находился до отвода для несельскохозяйственных потребностей [3].

Социально-экономическая эффективность рекультивации характеризуется повышением качества жизни населения, получением прибыли от использования рекультивированных земель, уменьшением срока окупаемости затрат, увеличением стоимости земель и достигается в результате улучшения экологического состояния восстановленной территории.

Для рационального использования нарушенных земель предусмотренные в проектной градостроительной и землеустроительной документации мероприятия рекультивации должны быть направлены на минимизацию негативных расхождений ΔE и ΔP (см. рисунок 2) и достижение положительного многолетнего социально-экономического баланса использования нарушенных земель ΔS (см. рисунок 3).

Анализ диаграмм жизненного цикла нарушенных земель позволяет выделить ключевые вопросы планирования их рационального использования.

Значение и знаки характеристик ΔE , ΔP и ΔS напрямую зависят от вида угодий, отведенных для несельскохозяйственных нужд, технологической схемы горнодобывающих и восстановительных работ, вида рекультивированных угодий и целевого назначения рекультивации. Соответственно, выбранные для практической реализации вид рекультивированных угодий и направление рекультивации должны быть наиболее целесообразными и рациональными при соответствующих локальных условиях [9].

Существующая технология принятия решений при планировании использования нарушенных земель в Украине, предусматривающая последовательные этапы анализа ситуации по использованию нарушенных земель, формированию соответствующих решений и организации их выполнения, направлена на устранение негативных экологических воздействий от нарушенных земель. Основным при этом является формирование решения, отсутствие системного определения которого не позволяет избежать необоснованных субъективных предпочтений проектировщика при принятии решений по использованию нарушенных земель.

Совершенствование существующей технологии принятия решений при планировании использования нарушенных земель (рисунок 4) предусматривает направление этапа формирования решения на решение двух взаимосвязанных задач выбора дальнейшего использования нарушенных земель с применением соответствующей методики [10].



Рисунок 4. – Схема рациональной технологии принятия решений при планировании использования нарушенных земель

Заключение. Новизна исследования заключается в разработке моделей жизненного цикла, отражающих процесс использования нарушенных земель или как однозначно выгодный, или как невыгодный, или как некий «нулевой» вариант (без заметных изменений на момент завершения жизненного цикла относительно начальных условий).

С помощью соответствующих диаграмм можно исследовать и комплексно оценивать относительную эффективность использования нарушенных горнодобывающим предприятием земель. Это позволит, в свою очередь, разрабатывать специальные приемы, мероприятия управления и технологии для улучшения соответствующего процесса на территории отдельного горнодобывающего предприятия и в горнодобывающей отрасли в целом.

Анализ моделей жизненного цикла позволяет определить принципы и направления оптимизации соотношения экономических, экологических и социальных убытков и доходов от антропогенной деятельности по добыче, переработке полезных ископаемых и восстановлению нарушенных земель.

Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования управления нарушенными землями, в частности контроля за использованием территорий открытых горных разработок на региональном и локальном уровнях отдельного горнодобывающего предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзак, О.С. Деградація та заходи ревіталізації земель України / О.С. Будзак // Землеустрій, кадастр і моніторинг земель. – 2014. – № 1–2. – С. 57–64.

2. Гавриловская, М.А. Оценка эффективности рекультивации нарушенных земель (экосистемный подход) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 08.00.05 / М.А. Гавриловская. – Екатеринбург, 2007. – 28 с.
3. Малахов, И.И. Новая геологическая сила / И.И. Малахов. – Кривий Ріг : ДНУ ВМГОР НАН України, 2009. – 312 с.
4. Прокопенко, В.І. Розвиток критеріїв оцінки ефективності землезбереження на відкритих розробках родовищ / В.І. Прокопенко, Т.М. Мормуль // Вісник НТУУ «КПІ». Гірництво. – 2011. – № 21. – С. 190–197.
5. Pavloudakis, F., Galetakisb M., Roumposa Ch. Aspatial decision support system for the optimal environmental reclamation of open-pitcoal mines in Greece / F. Pavloudakis, M. Galetakisb, Ch. Roumposa // Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2009. – Vol. 23, no. 4. – P. 291–303.
6. Monitoring and analysis of coastal reclamation from 1995–2015 in Tianjin Binhai New Area, China / W. Chen [et al.]. – Scientific Reports, 2017. – URL: www.nature.com/articles/s41598-017-04155-0.
7. Управління проектами у водному господарстві та природокористування / А.М. Рокочинський [и др.]. – Рівне : НУВГП, 2012. – 293 с.
8. Ястребова, О.В. Концептуальні підходи до визначення сутності інвестиційного проекту та його життєвого циклу. Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності / О.В. Ястребова. – 2015. – Вип. 2 (12). – Т. 3. – С. 150–155.
9. Артамонов, В.В. Системна соціально-екологічна оцінка антропогенно порушених земель. Геодезія, картографія і аерофотознімання / В.В. Артамонов, М.Г. Василенко, П.Б. Міхно. – 2016. – Вип. 83. – С. 112–116.
10. Міхно, П.Б. Аспекти методики вибору раціонального напрямлення використання нарушених земель України / П.Б. Міхно, В.В. Артамонов // Соціально-економічне розвиток території : матеріали II міжнарод. науч.-практ. конф. – Пенза, 2015. – С. 178–183.

Поступила 12.12.2018

MODELING OF THE LIFE CYCLE OF DISTURBED LANDS

P. MIKHNO

The article analyzes the process of development of land disturbed by mining activities. The signs of completeness, variation, functionality, staging allow us to consider the technological process of using disturbed lands as a separate life cycle, which is characterized by the need to apply certain measures of land management and land protection. In the life cycle of a disturbed land plot, three main aggregated stages are distinguished: design, functional, and restoration. Diagrams of the life cycle of disturbed lands under different conditions of the development of mineral deposits have been developed, reflecting the “zero”, “positive” and “negative” scenarios. With the help of such diagrams, it is possible to comprehensively analyze and evaluate the effectiveness of the use of the lands disturbed by the mining enterprise. This will allow the development of special techniques, events and technologies to improve the management of the relevant process on the territory of a separate mining enterprise and in the mining industry as a whole.

Keywords: mineral resources, field, development process, disturbed lands, life cycle, efficiency of use.

УДК 303.732.4:712.24

**ЭКОЛОГО-ХОЗЯЙСТВЕННЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ****канд. техн. наук И.Н. ШЕЛКОВСКАЯ****(Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, Украина)**

Рассматривается проблема эколого-хозяйственного состояния земельных ресурсов в связи с ростом хозяйственной деятельности человека и существенным изменением окружающей природной среды. По результатам определения коэффициентов антропогенной нагрузки, экологической стабильности, абсолютной и относительной напряженности, интегрального коэффициента природной защищенности и величины соотношения дестабилизирующих и экологически сбалансированных угодий оценена экологическая степень защищенности прибрежных территорий Кременчугского водохранилища в пределах Полтавской области. Определено, что для 1/8 части исследуемой территории экологическое состояние оценивается как удовлетворительное. Но при незначительных структурных изменениях может ухудшиться экологическое равновесие между угодьями. Землепользование в дальнейшем должно ориентироваться на рациональное использование и сохранение природно-ресурсного потенциала, оптимизацию структуры угодий в пользу лесного и природно-заповедного фонда, защиту берегов от водной абразии.

Ключевые слова: агроландшафт, эколого-хозяйственная оценка, экологическая стабильность, прибрежные зоны, структура земель.

В современных условиях землепользования очевиден факт, что с развитием продуктивных сил общества постоянно растет влияние нагрузки урбанизации природной среды, которое в первую очередь касается земельных ресурсов, в том числе на побережье искусственных водохранилищ. В последнее десятилетие в международной практике сформировалась концепция и методология комплексного управления прибрежными зонами (Integrated Coastal Zone/Area Management – ICZM/ICAM), которая является экономико-правовым механизмом гармонизации многочисленных противоречивых интересов прибрежного природопользования (добыча полезных ископаемых в шельфе, рыбное хозяйство, водный транспорт, промышленное и сельскохозяйственное развитие прибрежной зоны, рекреационный потенциал, заповедные территории). При этом социальные, экономические и экологические параметры рассматриваются в едином комплексе. Комплексное управление прибрежными зонами определяется как непрерывный и динамический процесс мониторинга и принятия решений, направленных на рациональное использование, развитие и сохранение прибрежных зон и ресурсов, в том числе и земельных [1].

Вопросы охраны природы являются ключевыми в обеспечении устойчивого развития. В связи с постоянно возрастающими площадями пахотных земель, их мелиоративного освоения, использованием минеральных и органических удобрений, строительством усиливается негативное влияние сельскохозяйственных объектов на экологическую ситуацию прибрежных зон и водных ресурсов. Это привело к ухудшению качества воды, эвтрофикации водоемов, повышению уровня грунтовых вод, переформированию берегов. Для уменьшения поступления в водные объекты биогенных элементов важным мероприятием является установление и благоустройство вдоль рек, вокруг озер, водохранилищ и других водоемов водоохраных зон и прибрежных защитных полос. И вместе с этим проведение оптимизации соотношений земельных угодий в ландшафтах по основным элементам, а именно обрабатываемым землям как экологически дестабилизирующим угодьям и землям, которые составляют экологический баланс и экологически уравнивают ландшафты прибрежных территорий водохранилищ, позволяет определить экологическое состояние и тип территории сельскохозяйственного использования агроландшафтов.

Для прибрежных территорий Кременчугского водохранилища характерными являются сильно измененные ландшафты, которые подверглись антропогенным изменениям. Поэтому вопросы оценки нагрузки именно на агроландшафты в современных условиях и их природной защищенности являются актуальными. Работы, посвященные земельным ресурсам в пределах бассейна Днепра, исследованию грунтов, проблемам подтопления земель в зоне влияния Днепровских водохранилищ, выполнялись учеными С.С. Дубняком [3], О.П. Канашом [4], А.М. Третьяком [5] и другими. Вопросам антропогенного изменения ландшафтов и оптимизации территории уделяли внимание Н.В. Белова [6], Б.И. Кочуров [7; 8], О.Л. Попова [9], П.Г. Шищенко [10] и другие. Но вместе с тем проблематика исследований землепользований в зоне действия водохранилищ еще далеко не исчерпана.

Целью представляемой работы является анализ особенностей землепользований и оценка эколого-хозяйственного состояния земельных ресурсов прибрежных территорий на примере Кременчугского водохранилища в пределах пяти административных единиц Полтавской области.

Информационную базу составили официальные статистические данные Госстата Украины о состоянии окружающей среды в регионах страны, статистические данные главного управления Госгеокадастра

в Полтавской области о наличии земель и их распределении по угодьям. Данные о структуре земельных угодий занесены в таблицу 1.

Таблица 1. – Структура земельных угодий исследуемых прибрежных территорий Кременчугского водохранилища в пределах Полтавской области

№ пор.	Угодья	Доля от площади Недогарской территориальной общины	Доля от площади Градижского поселкового совета	Доля от площади Пронозовского сельского совета	Доля от площади Бугаевского сельского совета	Доля от площади Святиловского сельского совета
1	Сельскохозяйственные земли	76,60	11,03	71,18	21,40	25,68
2	Леса	10,18	1,29	4,38	3,22	3,10
3	Застроенные земли	3,06	0,81	2,84	4,66	3,16
4	Открытые заболоченные земли	1,30	0,02	0,34	0,91	1,20
5	Открытые земли без растительности или с незначительным растительным покрытием	0,44	0,05	0,44	0,12	0,38
6	Земли под водой	8,41	86,8	20,82	69,69	66,48
	Всего	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Из всех земель:					
	- земли природоохранного назначения	1,78	0,15	–	49,42	64,76
	- земли рекреации	0,10	–	–	–	0,03

Показателями, указывающими на экологическую сбалансированность агроландшафтов, их устойчивость и степень преобразования под влиянием хозяйственной деятельности на прибрежных территориях, являются коэффициенты антропогенной нагрузки и экологической стабильности. Под экологической стабильностью агроландшафтов следует понимать их способность противостоять изменениям под действием различных факторов влияния, сохранить структуру и особенности функционирования при изменении условий среды, антропогенной нагрузки.

Коэффициент антропогенной нагрузки ($K_{ан}$) определяется по формуле:

$$K_{ан} = \frac{\sum P_i B_i}{\sum P_i}, \quad (1)$$

где P_i – площадь земель с соответствующим уровнем антропогенной нагрузки, га; B_i – балл соответствующей площади с соответствующим уровнем антропогенной нагрузки.

Согласно исследованиям А.М. Третьяка [5], землям промышленности, транспорта, населенных пунктов присваивают 5 баллов; пахотным землям, многолетним насаждениям – 4 балла; природным кормовым угодьям – 3 балла; лесополосам, кустарникам, лесам, болотам, землям под водой – 2 балла; микрозаповедникам – 1 балл.

Оценка влияния состава угодий на экологическую стабильность территории характеризуется коэффициентом экологической стабильности. Согласно [11], коэффициент экологической стабильности застроенных территорий и дорог приравнивается к 0; пашни – 0,14; лесополос – 0,38; фруктовых садов, кустарников – 0,43; огородов – 0,50; сенокосов – 0,62; пастбищ – 0,68; болот естественного происхождения – 0,79; лесов естественного происхождения – 1,00.

Коэффициент экологической стабильности определяется по формуле:

$$K_{эс} = \frac{\sum K_i P_i}{\sum P_i} \cdot K_p, \quad (2)$$

где P_i – площадь угодья i -того вида; K_i – коэффициент экологической стабильности угодья i -того вида; K_p – коэффициент морфологической стабильности рельефа (1 – для стабильных территорий; 0,7 – для нестабильных). В работе использовался коэффициент, равный 1.

Если полученное значения $K_{эс}$ меньше 0,33, землепользование относится к экологически нестабильному типу. Если данный коэффициент изменяется от 0,34 до 0,50, то землепользование относится к стабильно неустойчивому типу; при 0,51...0,66 – переходит к группе средней стабильности; если превышает 0,67 – территория землепользования является экологически стабильной [11].

Для территории побережья Кременчугского водохранилища в пределах пяти административных единиц Полтавской области коэффициент экологической стабильности находится в пределах 0,33...0,72 (таблица 2).

Таблица 2. – Степень экологической стабильности агроландшафтов побережья Кременчугского водохранилища

№ пор.	Административно-территориальные образования	$\Sigma K_i \cdot P_i$, га	ΣP , га	$K_{эс}$	Экологическая стабильность территории
1	Недогарская территориальная община	2763,0927	8120,0000	0,34	Неустойчиво стабильна
2	Градижский поселковый совет	45119,1020	62868,9000	0,72	Экологически стабильна
3	Пронозовский сельский совет	3235,3988	9210,9000	0,35	Неустойчиво стабильна
4	Бугаевский сельский совет	11644,4829	18186,8000	0,64	Среднестабильна
5	Святоловский сельский совет	10806,4892	17058,1600	0,63	Среднестабильна

Результаты исследования показали, что к экологически стабильным территориям относятся земельные ресурсы Градижского поселкового совета (наибольшая площадь пахоты – 6376,2810 га, но и наибольшая площадь земель под водой – 54569,4987 га). Площадь агроландшафтов составляет 54%.

Неустойчиво стабильные территории занимают 15% общей площади исследований. В структуре агроландшафтов преобладают пахотные земли (больше 85% от площади сельскохозяйственных угодий).

Уровень и направленность антропогенного воздействия, степень устойчивости ландшафтов к различным видам антропогенной нагрузки можно оценить по методике эколого-хозяйственного состояния (ЭХС) территории, предложенной в [7; 8]. Эта идея может быть реализована через концепцию эколого-хозяйственного баланса (ЭХБ), которая нацелена на решение земельно-экологических проблем путем совершенствования структуры землепользования. Другими словами, ЭХБ – это сбалансированное соотношение различных видов деятельности и интересов различных групп населения на территории с учетом потенциальных возможностей природы, которое обеспечивает устойчивое развитие природы и общества, воспроизводство природных ресурсов и не вызывает негативных экологических изменений и последствий [12].

Для определения ЭХБ территории используются следующие характеристики: распределение земель по видам и степени антропогенной нагрузки, напряженность эколого-хозяйственного состояния территории, интегральная антропогенная нагрузка, естественная защищенность территории, экологический фонд территории.

Антропогенная нагрузка на ландшафт по методике ЭХБ оценивается по видам использования земель и характеру заселения территории (плотности населения). Земли по видам использования, а также по интенсивности использования объединяются в однородные группы по соответствующей оценке степени нагрузки по шкале от 1 до 6 (таблица 3). По этой методике леса, пастбища и сенокосы, которые используются нерационально, классифицируются как земли, имеющие высокую степень антропогенной нагрузки, а используемые рационально относятся к землям с низкой нагрузкой.

Таблица 3. – Классификация земель по степени антропогенной нагрузки

Категория земель	Степень антропогенной нагрузки	Балл	Площадь земель, га
Земли промышленности, транспорта, связи, жилой и общественной застройки, нарушенные и оработанные земли	Наивысшая	6	248,5027
Орошаемые и осушенные земли	Очень высокая	5	0
Земли сельскохозяйственного назначения	Высокая	4	5703,9066
Многолетние насаждения и рекреационные земли	Средняя	3	70,4238
Земли лесного фонда, пастбища	Низкая	2	1342,2284
Природоохранные и неиспользуемые земли	Очень низкая	1	754,9385

Коэффициент абсолютной напряженности (K_a) определяется по формуле:

$$K_a = \frac{S_{\max}}{S_{\min}}, \quad (3)$$

где S_{\max} – площадь земель с высокой антропогенной нагрузкой; S_{\min} – площадь земель с очень низкой антропогенной нагрузкой.

Значения коэффициента K_a : очень незначительная напряженность < 0,99; незначительная напряженность составляет 1...1,99; средняя напряженность – 2...2,99; повышенная напряженность – 3...3,99; высокая напряженность > 4.

Эколого-хозяйственное состояние территории в полной мере характеризует также коэффициент относительной напряженности (K_o), который характеризуется отношением площадей земель с более высокой антропогенной напряженностью к площади земель с низкой напряженностью [7; 8] и определяется как

$$K_o = \frac{\sum AN_{4-6}}{\sum AN_{1-3}}, \quad (4)$$

где $\sum AN_{4-6}$ – площадь земель с баллами 4...6 антропогенной нагрузки; $\sum AN_{1-3}$ – площадь земель с баллами 1...3 антропогенной нагрузки.

Значения коэффициента K_o : сбалансированная напряженность < 0,99; очень низкая напряженность 1...1,99; низкая напряженность 2...2,99; средняя напряженность 3...3,99; высокая напряженность > 4.

Напряженность ландшафтов от хозяйственной деятельности негативно сказывается на восстановлении качества ресурсов и среды обитания. Это выражается через показатель экологического фонда территории, который характеризуется большим количеством и равномерным распределением природных экосистем, урочищ, природоохранных зон. Этот показатель является суммой площадей земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями (P_{cp}) и определяется по следующей формуле:

$$P_{cp} = P_1 + 0,8 \cdot 0,2 + 0,6 \cdot P_3 + 0,4 \cdot P_4, \quad (5)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 – площади земель с соответствующим уровнем (1, 2, 3, 4) антропогенной напряженности [10].

Интегральный коэффициент экологической (естественной) защищенности определяется как

$$K_{зз} = \frac{P_{cp}}{P_{общ}}. \quad (6)$$

где $P_{общ}$ – общая площадь территории, га; P_{cp} – площади земель со средо- и ресурсостабилизирующими функциями, га.

Здесь коэффициент $K_{зз}$ меньше 0,5, это свидетельствует о критическом уровне экологической защищенности территории и обусловлено большой площадью пашни урбанизированных и нарушенных земель.

Показатели оценочных коэффициентов в рамках исследуемой территории приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Степень антропогенной напряженности прибрежных территорий Кременчугского водохранилища

№ пор.	Административно-территориальные образования	Коэффициент абсолютной напряженности (K_a)	Коэффициент относительной напряженности (K_o)
1	Недогарская территориальная община	0,33	2,75
2	Градижский поселковый совет	0,01	0,13
3	Пронозовский сельский совет	0,14	2,11
4	Бугаевский сельский совет	0,07	0,30
5	Святиловский сельский совет	0,04	0,36

Для региона исследований средний коэффициент K_a равен 0,12, а в рамках административных единиц находится в пределах 0,01...0,33 и характеризует наличие природоохранных, покрытых лесом и водой участков. Поэтому значительно стойкими ландшафтами являются ландшафты с низким K_a .

Величина коэффициента относительной напряженности колеблется в пределах 0,13...2,75, указывая тем самым на то, что эколого-хозяйственное состояние территории Градижского поселкового совета, Бугаевского и Святиловского сельских советов является сбалансированным по степени антропогенной напряженности. Особенность структуры земель указанных административных единиц заключается в показателе площадей под водой (86,8; 69,69 и 66,48% от общей площади административно-территориального образования соответственно).

Интегральный коэффициент экологической защищенности на исследуемой территории находится в пределах 0,51...0,93. Недогарская территориальная община близка к критическому уровню естественной защищенности территории ($K_{зз} = 0,51$) вследствие недостаточных площадей экологостабилизирующих угодий в структуре земельного фонда.

Дальнейшее исследование экологического состояния агроландшафтов проводилось по степени антропогенных изменений ландшафтов путем вычисления соответствующего коэффициента по методике П.Г. Шищенко [10] для девяти видов земельных угодий разного вида целевого использования. В пределах пяти административно-территориальных образований побережья Кременчугского водохранилища этот коэффициент выше 10, что свидетельствует о существенных изменениях ландшафтов.

Степень нарушения экологического равновесия в соотношении основных типов угодий в агроландшафтах оценивалась по пятибалльной шкале согласно методике, изложенной в [13], в соответствии с которой в случае увеличения в составе ландшафтов природных комплексов ландшафты из состояния нарушенных переходят к более стойким. Данные о соотношении фактической структуры земельных угодий пахоты к эколого-стабилизирующим угодьям (лес, болота, земли под водой, сенокосы, пастбища) представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Оценка экологического состояния агроландшафтов по соотношению угодий

№ пор.	Административно-территориальные образования	Общая площадь территории, га	Площадь пахоты, га	Площадь эколого-стабилизирующих угодий, га	Соотношения угодий	Экологическое состояние
1	Недогарская территориальная община	8120,0000	5308,4000	2341,4701	2,3:1	Удовлетворительное
2	Градижский поселковый совет	62868,9000	6376,2810	55692,4687	1:8	Оптимальное
3	Пронозовский сельский совет	9210,9000	5758,6192	2986,6906	1,9:1	Удовлетворительное
4	Бугаевский сельский совет	18186,8000	3157,1446	14067,2800	1:4,4	Хорошее
5	Святиловский сельский совет	17058,1600	3273,9900	13055,8284	1:3,9	Хорошее

В соответствии с результатами оценки экологического состояния сельскохозяйственных ландшафтов, выполненной по соотношениям пахоты к площади экологостабилизирующих угодий на прибрежных территориях Кременчугского водохранилища в пределах пяти административных единиц Полтавской области, выделены три типа территорий с экологическим состоянием – от оптимального до удовлетворительного. На территории двух административно-территориальных образований экологическое состояние оценивается как удовлетворительное. Они занимают около 12% общей площади исследований и даже при незначительных структурных изменениях могут ухудшить экологическое равновесие между угодьями. Экологическое состояние 88% площади исследуемой территории характеризуется как хорошее и оптимальное.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**: вся исследуемая территория подвержена значительным антропогенным преобразованиям ландшафтов, что связано с высоким сельскохозяйственным освоением земель, расположением территорий на побережье искусственного водохранилища, которое имеет высокое воздействие на земельные ресурсы малых площадей, покрытых лесами, и с низким природоохранным статусом.

Дальнейшее хозяйственное развитие исследуемого региона должно ориентироваться на рациональное использование и сохранение природно-ресурсного потенциала территории. Это позволит минимизировать и в будущем не допускать развитие негативных процессов при взаимодействии природных и хозяйственных систем. Приоритетной задачей рационального землепользования является оптимизация структуры угодий в пользу естественных составляющих агроландшафта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Taussik, J. Networking in Integrated Coastal Zone Management. Partnership in Coastal Zone Management / J. Taussik, S. Gubbay. – Samara : Cardigan, 1996. – 57 p.
2. Шелковська, І.М. Шляхи використання земельних ресурсів прибережних територій Кременчуцького водосховища / І.М. Шелковська // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2015. – Вип. 2/2015 (91). – С. 170–175.
3. Дубняк, С.С. Аналіз існуючих підходів до районування водосховищ та пропозиції по його удосконаленню / С.С. Дубняк // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – К. : Ніка-Центр, 2001. – Т. 2. – С. 295–302.
4. Канащ, О. Критичний огляд традиційних підходів щодо оптимізації землекористування / О. Канащ // Землевпорядний вісник. – 2010. – № 12. – С. 13–17.
5. Третяк, А.М. Методичні рекомендації оцінки екологічної стабільності агроландшафтів та сільськогосподарського землекористування / А.М. Третяк, Р.А. Третяк, М.І. Шквар. – К. : Інститут землеустрою УААН, 2001. – 15 с.
6. Белова, Н.В. Степень антропогенной трансформации агроландшафтов Предкарпатья и их рациональное использование / Н.В. Белова // Acta Geographica Silesiana : Uniwersytet Śląski. – Sosnowiec. – 2016. – № 21. – S. 13–23.

7. Кочуров, Б.И. Экологически безопасное и сбалансированное развитие региона / Б.И. Кочуров // Известия АН СССР. – 2001. – № 4. – С. 87–92.
8. Кочуров, Б.И. Оценка эколого-хозяйственного состояния территории административного района / Б.П. Кочуров, Ю.Г. Иванов // География и природные ресурсы. – 1987. – № 4. – С. 49–54.
9. Попова, О.Л. Екодіагностика природо-господарської організації території України: агроландшафтний аспект / О.Л. Попова // Економіка і прогнозування. – 2012. – № 3. – С. 92–101.
10. Шищенко, П.Г. Принципы и методы ландшафтного анализа в региональном проектировании / П.Г. Шищенко. – Киев : Фитосоциоцентр, 1999. – 284 с.
11. Волков, С.Н. Землеустройство / С.Н. Волков. – М. : Колос, 2001. – Т. 2 : Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство : учеб. пособие. – 648 с.
12. Методы обоснования программ устойчивого развития сельских территорий / под ред. В.И. Фролова. – С.-Петербург. гос. архитектурно.-строит. ун-т. – СПб., 2011. – С. 312–319.
13. Фурдичко, О.І. Методологія управління агроландшафтами лісомеліоративними методами (науково-методичне забезпечення) / О.І. Фурдичко, А.П. Стадник. – К. : Аграрна наука, 2010. – 60 с.

Поступила 26.12.2018

ENVIRONMENTAL ECONOMIC APPROACH IN THE ESTIMATION OF THE USE OF LAND RESOURCES OF COASTAL TERRITORIES

I. SHELKOVSKA

The article is devoted to the problem of the ecological and economic condition of land resources in connection with the growth of human economic activity and a significant change in the environment is considered. Based on the results of determining the anthropogenic load factors, environmental stability, absolute and relative stress, integral natural protection factor and the ratio of destabilizing and environmentally balanced land, the environmental degree of protection of the coastal areas of the Kremenchug water basin within the Poltava region was determined. It was determined that at 1/8 of the study area, the ecological condition is assessed as satisfactory. But with minor structural changes, the ecological balance between wetlands can deteriorate. In future, land use should focus on the rational use and preservation of the natural resource potential, optimization of the land structure in favor of the forest and natural reserve fund, protection of the coast from water abrasion.

Keywords: *agricultural landscape, environmental and economic assessment, environmental stability, coastal areas, land structure.*

УДК 66.013.8

**ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ ПОТОКА
НА ДИСПЕРСНОСТЬ ЭМУЛЬСИИ НА ОСНОВЕ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ****В.А. ДРОНЧЕНКО***(Полоцкий государственный университет)*

Дана оценка нефтесодержащим отходам, образующимся на участке по разборке и очистке технологического оборудования. Предложены способы их переработки и утилизации. Проведен анализ влияния амплитуды пульсаций скорости потока на процесс эмульгирования двух несмешивающихся жидкостей, одной из которых являются нефтесодержащие отходы. Расчеты проведены для отходов с различной плотностью. Даны рекомендации, позволяющие повысить потребительские качества получаемой эмульсии.

Ключевые слова: *геоэкология, утилизация, нефтесодержащие отходы, дисперсность, стабильность эмульсии.*

Введение. В результате производственной деятельности предприятия образуются опасные для рабочих и окружающей среды отходы. По данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды в Республике Беларусь в 2017 году образовалось 55 506 тыс. тонн отходов производств. Использовано, передано за год лишь 15 798 тыс. тонн [1]. Таким образом, в Республике Беларусь масса отходов производств за это время увеличилась и превысила 1,17 млрд тонн. При таком темпе прироста (3...4% в год) отходов на предприятиях республики через 25...30 лет будет находиться более двух миллиардов тонн отходов, которые даже при соблюдении всех существующих правил и норм хранения и захоронения представляют потенциальную опасность как для работников этих предприятий, так и для окружающей среды в целом [2; 3].

Темпы прироста отработанных растворов и отходов эмульсий и смесей нефтепродуктов (НП) превышают от 3 до 10 раз темпы прироста отходов в среднем по республике [4], что требует проведения соответствующих мероприятий, направленных на улучшение ситуации. Среди таких отходов особое место занимают отработанные растворы технических моющих средств (ТМС) и нефтесодержащие отходы (НСО) участка по разборке и очистке технологического оборудования, которые, с одной стороны, представляют угрозу для здоровья и жизни работников предприятий, населения и окружающей среды, а с другой – содержат моторные и трансмиссионные масла, консистентные смазки, топливные фракции, смазочно-охлаждающие технические средства (СОТС), промывочные жидкости и другие вещества, которые могут быть не только веществами, угрожающими окружающей среде, но и ценным сырьем, позволяющим снизить зависимость страны от импорта [3; 5].

Говоря о маслах, доля которых в нефтесодержащей составляющей отходов участка по разборке и очистке технологического оборудования составляет 94% [2], следует отметить неудовлетворительное состояние вопроса с их сбором и утилизацией, требующее безотлагательной его проработки. Так, в Республике Беларусь ежегодно потребляется около 100 тысяч тонн автомобильных и промышленных масел [6], а количество отходов, образующихся в результате их использования, составляет 80...85% от их первоначального объема. Ежегодно предприятиями страны собирается и перерабатывается (без учета сжигания) всего 8300 тонн отработанных масел, что составляет менее 10% от потребления [6]. Между тем мировой сбор отработанных масел составляет более 50% производства свежих [7]. Как видим, Республика Беларусь в настоящее время существенно отстает от промышленно развитых стран, хотя и в странах Евросоюза до 1,4 млн тонн масел в год просто сливается в окружающую среду либо нелегально сжигается [7].

В качестве комплексного решения в части исключения вредного влияния на здоровье рабочих и окружающую среду НСО предлагается их переработка и утилизация. В частности, в Полоцком государственном университете проводятся исследования с целью разработки технологии приготовления мелкодисперсной эмульсии из НСО с возможностью использования отработанных растворов ТМС [2; 5; 8; 9]. В процессе приготовления эмульсии поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей разрушаются ударными волнами, возникающими при работе пневматического излучателя (ПИ). Использование этой технологии позволит защитить окружающую среду от вредного воздействия НСО. Для усовершенствования технологии получения эмульсии с требуемой стабильностью необходима оценка влияния амплитуды пульсаций скорости потока на стабильность эмульсии.

Основная часть. Процесс распада зависит от вязкости, плотности и поверхностного натяжения жидкости, а также скорости течения и амплитуды её пульсации. Влияние вынуждающей силы резко ускоряет процесс [10]. Генерируя в ёмкости с жидкостями пневматическим излучателем ударно-волновые процессы, можно достигнуть роста нестабильности поверхности раздела и её разрушения. В объёме

жидкости кроме волновых явлений около ПИ будут возникать кавитационные процессы с образованием в жидкости воздушных полостей с последующим их быстрым захлопыванием [10]. При этом жидкость в окрестности воздушного пузыря и часть нижележащей жидкости перемещаются по направлению к центру захлопывающегося пузыря. Образующиеся струи дробят капли эмульсии.

Стабильность эмульсии (способность сохранять свои первоначальные свойства по всему объему с течением времени) определяется объемом выделившегося неэмульгированного вещества в процентах от общего объема эмульсии [9]. На стабильность эмульсии влияют ее концентрация, размер частиц и вязкость, с одной стороны, а также число возможных рекомбинаций, т.е. слияние мелких капель жидкости в более крупные – с другой.

Скорость оседания капель воды в эмульсии выражается формулой Стокса, которая показывает, что скорость оседания капли пропорциональна квадрату её радиуса. Чем меньше радиус капли, тем выше стабильность эмульсии. Так, например, при размере в 30...50 мкм капля будет оседать более месяца на глубину до одного метра [2]. Поэтому для получения стабильной эмульсии необходимо стремиться к уменьшению размеров капель воды в эмульсии.

Механизм образования эмульсии на основе нефтесодержащих отходов. Разрушение поверхностей раздела сред при эмульгировании, распад струй и капель рассматривались в [10]. В основе процесса формирования эмульсий лежит потеря гидродинамической устойчивости течения двух жидкостей. Разрушение раздела двух несмешивающихся жидкостей происходит с проникновением тяжелой жидкости в более легкую [10], сначала в виде узкого клина, который с ростом возмущения поверхности разрывается на капли.

Для упрощения расчета выбрана форма импульсной функции $\psi(\tau)$, представленная на рисунке 1, и введены следующие безразмерные величины: $\tau = \omega t$ – безразмерное время (где ω – круговая частота пульсаций скорости, t – время); $\Omega = \rho_1 / \rho_2$ – безразмерная плотность (где ρ_1 – плотность НСО, ρ_2 – плотность воды); $E = \Delta v / v_0$ – безразмерная амплитуда пульсаций скорости потока (где v_0 – начальная скорость потока; Δv_0 – изменение скорости потока); $\Lambda = \sigma \varphi / \rho_1 v_0^2$ – безразмерное волновое число (где σ – поверхностное натяжение, $\varphi = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны); $Sh = \sigma \omega / \rho_1 v_0^3$ – критерий Струхалы.

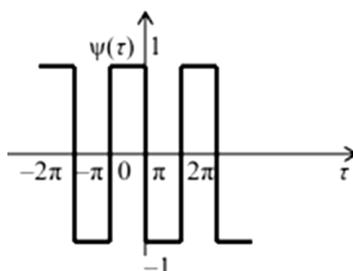


Рисунок 1. – Расчетная схема импульсной функции $\psi(\tau)$

Все это позволило получить уравнение, описывающее движение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей в виде обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка

$$U'' + (a + b\psi)U = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{Sh^2} \left(\frac{2\Lambda^3}{1-\Omega} + \Lambda^2(1+E^2) \right), \quad b = 2\Lambda^2 \frac{E}{Sh^2}.$$

Уравнение (1) является аналогом уравнения Хилла [11; 12] и имеет решение в следующем виде:

$$U(\tau) = e^{\mu\tau} \phi(\tau), \quad (2)$$

где μ – характеристический показатель, зависящий от a и b ; $\phi(\tau)$ – периодическая функция с действительным периодом 2π .

Решение (2) будет устойчивым или неустойчивым в зависимости от того, будет ли характеристический показатель μ мнимым или будет иметь действительную часть. Именно действительная часть характеристического показателя позволяет определить параметры работы пневматического излучателя, соответствующие максимально растущему возмущению. То есть именно характеристический показатель определяет длину волны наиболее неустойчивого возмущения поверхности раздела двух сред и размер капель воды в эмульсии на основе НСО.

Полученная формула позволяет вычислить значения характеристического показателя μ для выбранной формы импульсной функции $\psi(\tau)$:

$$ch2\pi\mu = \cos(\pi\sqrt{a+b})\cos(\pi\sqrt{a-b}) - \frac{a}{\sqrt{a^2-b^2}}\sin(\pi\sqrt{a+b})\sin(\pi\sqrt{a-b}). \quad (3)$$

Решение (3) имеет вид

$$\mu = \mu_R + i\mu_I, \quad (4)$$

где μ_R – действительная часть; μ_I – мнимая часть.

Решения (3), соответствующие действительной части $\mu_R > 0$, позволяют определять то значение волнового числа, которое соответствует максимально растущему возмущению.

Также проведены исследования по оценке влияния плотности НСО на значение μ_R . Графики, устанавливающие зависимость $\mu = f(\Omega, \Lambda)$ от плотности НСО при $E = 1$ и $Sh = 1$, представлены на рисунке 2, из которых видно, что возникает несколько областей неустойчивого возмущения. Области с максимальным значением μ_R показаны на рисунке 3.

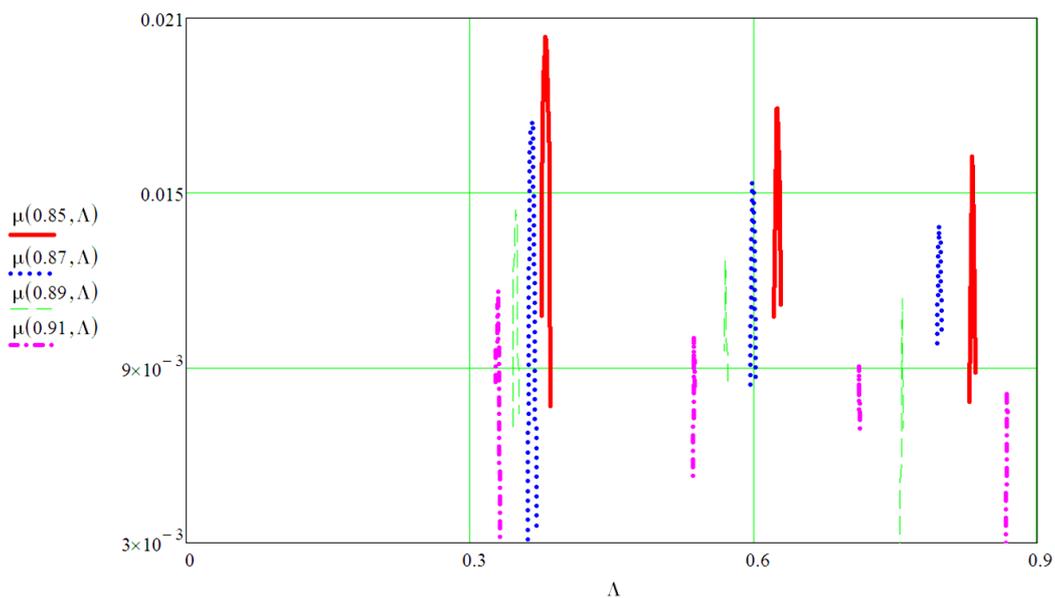


Рисунок 2. – Зависимости $\mu(\Omega, \Lambda)$ при $E = 1, Sh = 1$

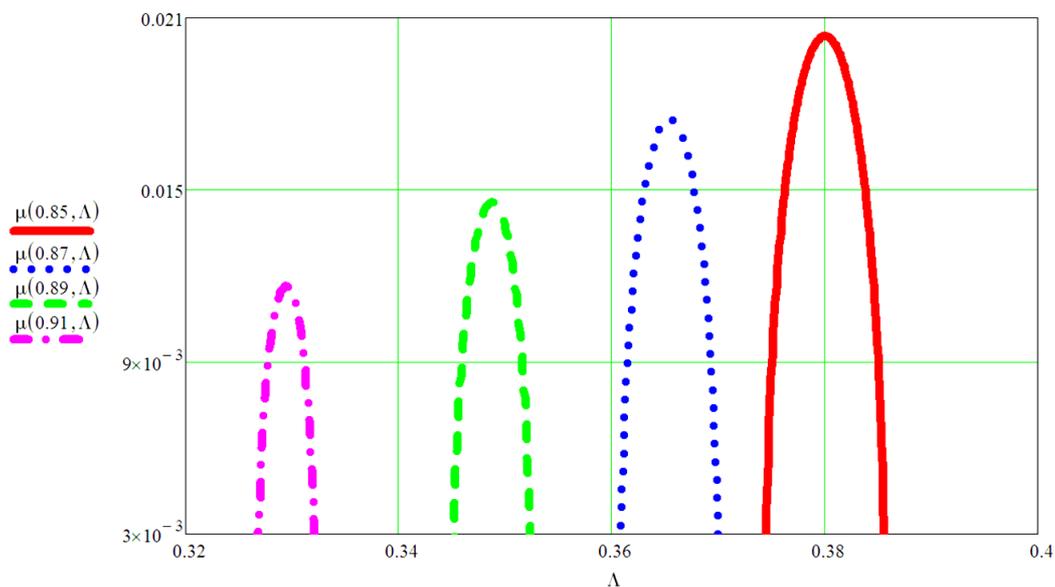


Рисунок 3. – Зависимости $\mu(\Omega, \Lambda)$ при $E = 1, Sh = 1$

Результаты исследования влияния параметра амплитуды пульсаций скорости потока на значение μ_R в виде графиков, устанавливающих зависимость $\mu = f(E, \Lambda)$ при $E = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00$ и постоянных значениях $\Omega = 0,9$, $Sh = 1$, представлены на рисунках 4 и 5, из которых также видно, что возникает несколько областей неустойчивого возмущения.

На рисунке 5 показаны области с максимальным значением μ_R . Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4 и 5, позволяет сделать вывод о том, что увеличение амплитуды пульсаций скорости потока способствует увеличению значений μ_R . Это приводит к уменьшению размеров капель воды в эмульсии на основе НСО, а значит и к повышению стабильности полученной эмульсии.

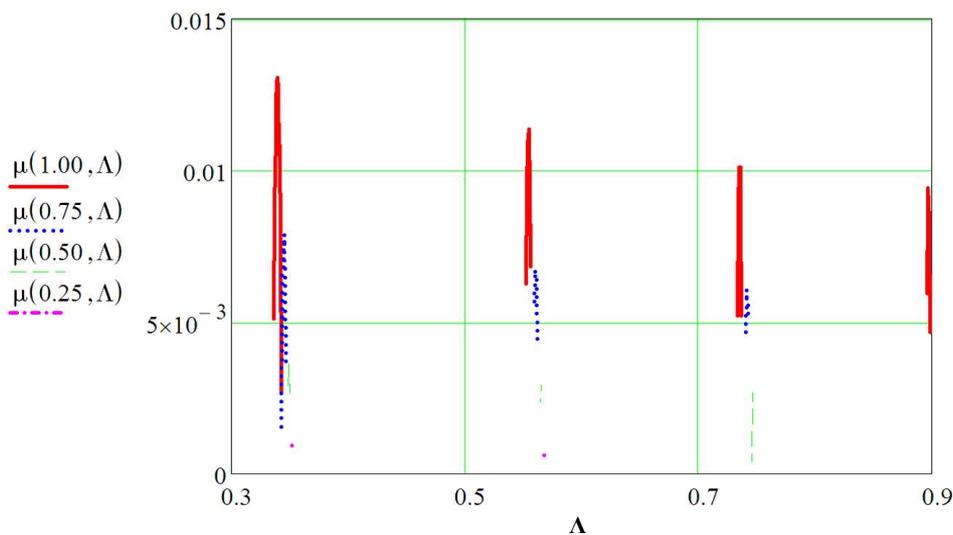


Рисунок 4. – Зависимости $\mu(E, \Lambda)$ при $\Omega = 0,9$, $Sh = 1$

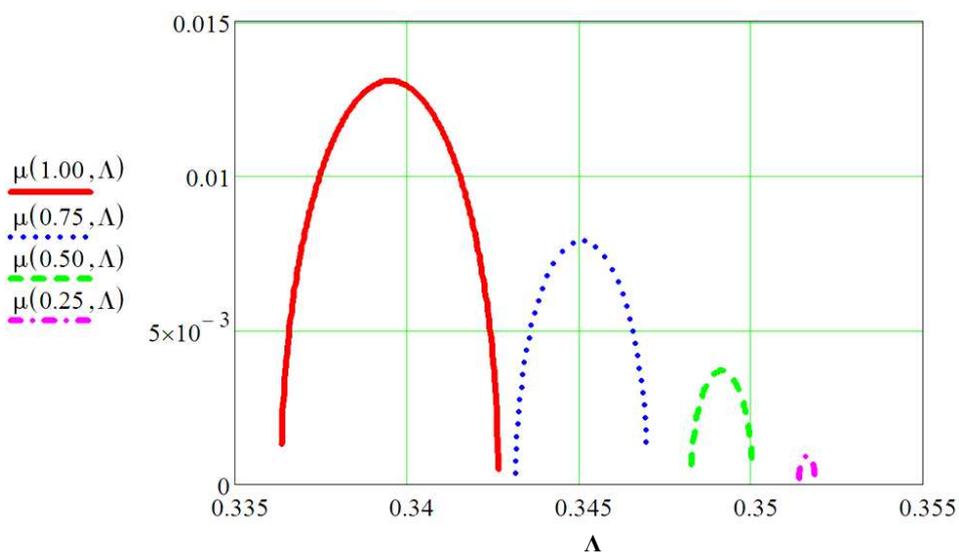


Рисунок 5. – Зависимости $\mu(E, \Lambda)$ при $\Omega = 0,9$, $Sh = 1$

Таким образом, приходим к выводу, что установленные зависимости позволяют значительно сократить объем экспериментальных исследований по получению эмульсии на основе НСО и растворов ТМС с заранее заданной стабильностью. В результате появляются возможности для широкого использования предложенных технологий с охраной труда работников от воздействия вредных факторов, связанных с влиянием указанных отходов на их здоровье.

Экспериментальные исследования подтверждают теоретические расчеты, связанные с определением параметров работы ПИ, позволяющих получить капли эмульсии определенного размера. Разме-

ры капель дисперсной фазы (воды) определяли при помощи объект-микрометра и микроскопа стереоскопического МБС-10. На рисунке 6 представлен фотоснимок эмульсии на основе НСО под микроскопом.

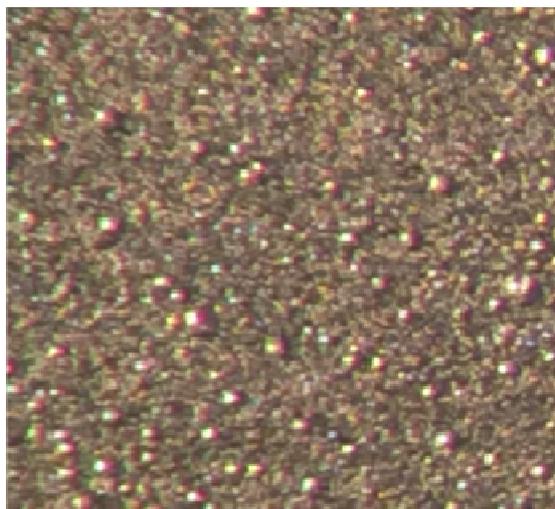


Рисунок 6. – Фотоснимок эмульсии при увеличении ($\times 100$)

На рисунке 7 показано распределение размеров капель дисперсной фазы (воды) эмульсии по линейным размерам, приготовленной на основании НСО с помощью ударных волн, генерируемых ПИ, с содержанием воды 40% от объема эмульсии. Максимальное число капель лежит в диапазоне размеров 40...60 мкм и составляет 37%.

Содержание капель размером менее 20 мкм составляет около 8%, а содержание крупных капель воды размером более 120 мкм близко к нулю. Из данной эмульсии выделилось 2% воды за 9 суток, что соответствует теоретическим расчетам, проведенным для капель диаметром 50 мкм.

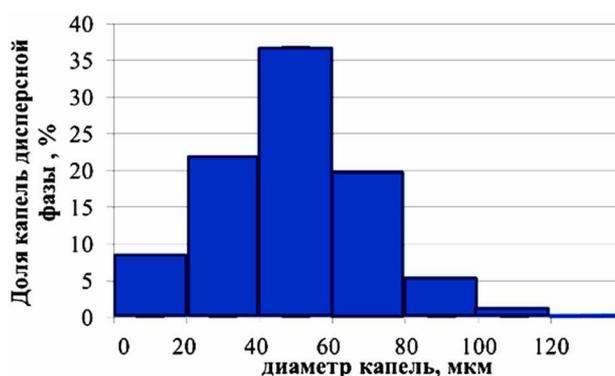


Рисунок 7. – Распределение капель дисперсной фазы (воды) эмульсии по диаметру

Экспериментальные исследования показали, что уменьшение диаметра капель воды в эмульсии до 20 мкм достигается благодаря уменьшению длины волны поверхности раздела НСО и воды до 40 мкм. В такой эмульсии при содержании воды до 30% в течение 30 суток выделяется воды не более 2% (об.), что позволяет использовать эмульсию в качестве товарного продукта (например, в качестве материала антиадгезионного покрытия форм при изготовлении железобетонных изделий либо в качестве добавки к основному топливу котельных).

Заключение. В результате проведенного исследования *раскрыт механизм* эмульгирования двух несмешивающихся жидкостей за счет разрушения поверхности их раздела ударными волнами, генерируемыми ПИ, *определяющий условия* образования пригодной для дальнейшего использования эмульсии из НСО, *обеспечивающий защиту* окружающей среды и работников от вредного воздействия НСО и *устанавливающий*, что размер капель воды в эмульсии зависит от длины волны наиболее неустойчиво-

го возмущения поверхности раздела НСО и воды, которое, в свою очередь, определяется значениями действительной части характеристического показателя, которые возрастают при увеличении амплитуды пульсаций скорости потока.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сократить объем экспериментальных исследований и оптимизировать технологию приготовления эмульсии на основе НСО, что в определенной мере решит проблему защиты окружающей среды и здоровья работников предприятий от воздействия НСО и отработанных растворов ТМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс] : статистический отчет. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2018. – Режим доступа: <http://www.belstat.by>. – Дата доступа: 30.08.2018.
2. Иванов, В.П. Охрана труда рабочих и защита окружающей среды от вредного влияния нефтесодержащих отходов / В.П. Иванов, В.А. Дронченко. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 248 с.
3. Иванов, В.П. Защита окружающей среды от отработавших водных растворов технических моющих средств / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 160–165.
4. Республика Беларусь Ежегодный статистический отчет [Электронный ресурс] : статистический ежегодник 2016. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2016. – Режим доступа: <http://www.belstat.by>. – Дата доступа: 17.08.2017.
5. Иванов, В.П. Утилизация нефтесодержащих отходов вспомогательного производства нефтехимических предприятий / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Природопользование. – 2016. – № 30. – С. 136–145.
6. Информация о сборе отработанных масел в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belta.by>. – Дата доступа: 15.11.2016.
7. Смазочные материалы и проблемы экологии / А.Ю. Евдокимов [и др.]. – М. : Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 424 с.
8. Дронченко, В.А. Рециклинг жидких производственных отходов, содержащих нефтепродукты / В.А. Дронченко // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии ; под ред. А.И. Свириденка. – Ч. II. Труды второй науч.-техн. конф. – Гродно, 1997. – С. 308–311.
9. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.
10. Иванов, В.П. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестник БрГТУ. Машиностроение. – 2014. – № 4 (88). – С. 38–42.
11. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1970. – 904 с.
12. Якубович, В.А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения / В.А. Якубович, В.М. Старжинский. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

Поступила 20.12.2018

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE DISPERSITY OF THE EMULSION BASED ON OILY WASTE

V. DRONCHENKO

The assessment of oily waste generated at the site for disassembly and cleaning of technological equipment is given. The ways of their processing and utilization are offered. The influence of the amplitude of the flow rate pulsations on the emulsification process of two immiscible liquids, one of which is oily waste, is analyzed. Calculations are carried out for waste with different density. Recommendations are given to improve the consumer quality of the resulting emulsion.

Keywords: geo-ecology, utilization, oily waste, dispersion, emulsion stability.

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Платонова Р.М., Зеленков А.Т.</i> Архитектурно-градостроительное наследие города Дисны	2
<i>Брянцев Е.Г., Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н.</i> К вопросу выбора вариантов объемно-планировочных и конструктивных решений при проектировании крупнопанельных жилых зданий	13

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

<i>Санникова О.Г., Тур В.В.</i> Основные положения модели «распорки и тяжи» для определения сопротивления срезу железобетонных элементов	19
<i>Санникова О.Г., Тур В.В.</i> Верификация модели «распорки и тяжи» для однопролетных железобетонных балок, нагруженных сосредоточенной силой	30
<i>Кремнев А.П., Кремнева Е.Г., Радкевич Р.А.</i> Экспериментально-теоретические исследования плит из пенобетона и тонкостенного стального холоднодеформированного оцинкованного профиля	37
<i>Малиновский В.Н., Матвеевко Н.В.</i> Особенности напряженно-деформированного состояния балок с изменяющейся высотой сечения	43

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

<i>Павлова И.П.</i> Модель расширяющегося бетонного композита для прогнозирования величины самонапряжения напрягающего фибробетона	49
<i>Кравченко В.В.</i> Моделирование распределения воды в поровой среде цементного камня в условиях внутреннего ухода	55
<i>Долгонож А.В., Бакатович А.А.</i> Исследование теплофизических характеристик стеновых материалов в условиях эксплуатации зданий	61
<i>Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Хватынец В.А., Трамбицкий Е.А.</i> Методика сопровождения развития структурных дефектов в цементных системах	67
<i>Нияковский А.М.</i> Разработка математической модели процесса твердения бетона на основе трехмерного уравнения теплопроводности	72
<i>Павлова И.П.</i> Исследование и оценка свойств бетонов с выявлением возможных причин появления дефектов («отстрелов») в конструкциях	80
<i>Романовский С.А., Бакатович А.А.</i> Степень влияния факторов на основные физико-механические показатели теплоизоляционных плит из очесов льна	87
<i>Беломесова К.Ю.</i> Высокоэффективные композитные системы, дисперсно-армированные базальтовым фиброволокном	93
<i>Калиновская Н.Н., Котов Д.С., Щербицкая Е.В.</i> Опыт разработки и применения суспензии микрокремнезема в Республике Беларусь	98
<i>Азаров С.М.</i> Структура пористых гранул на основе кварцевого песка для очистки промывных вод	103

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

<i>Глухов Д.О., Глухова Т.М., Андриевский А.П., Янушонок А.Н.</i> Баланс газа в системе взаимосвязанных магистральных газопроводов в рамках неизотермической стационарной модели транспортировки газа	107
<i>Нияковский А.М., Москалёнок Ф.И., Нияковский А.А.</i> Исследование факторов, приводящих к завышению температуры греющего теплоносителя на выходе пластинчатых теплообменников в индивидуальных тепловых пунктах жилых зданий	110
<i>Ющенко В.Д., Велюго Е.С., Пивоварова С.И.</i> Анализ применения фильтрующих материалов для удаления загрязнений из подземных вод сложного состава	116

ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Волков Д.О.</i> Рекомендуемый алгоритм получения плана фасада здания с помощью обзорной камеры электронного тахеометра	120
<i>Ярмоленко А.С., Скобенко О.В.</i> Применение рядов Фурье в фильтрации геоинформации	128
<i>Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Парадня П.Ф.</i> Аэросъемка с беспилотного летательного аппарата	135
<i>Михно П.Б.</i> Моделирование жизненного цикла нарушенных земель	143
<i>Шелковская И.Н.</i> Эколого-хозяйственный подход в оценке использования земельных ресурсов прибрежных территорий	150
<i>Дронченко В.А.</i> Влияние амплитуды пульсаций скорости потока на дисперсность эмульсии на основе нефтесодержащих отходов	156