ВЕСТНИК ТГАСУ

ISSN 1607-1859

Подписной индекс 20424
в Объединенном Каталоге «Пресса России»

ВЕСТНИК ТГАСУ № 4 2014

ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
У Н И В Е Р С И Т Е Т А

4
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

В Е С Т Н И К

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
У Н И В Е Р С И Т Е Т А

№ 4 (45) 2014

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайте «Научная электронная библиотека»: http://www.elibrary.ru, а также на сайте ТГАСУ: http://www.tsuab.ru

Научное издание
ВЕСТНИК ТГАСУ № 4 – 2014
ISSN 1607-1859

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.

Редакторы Т.С. Володина, Е.А. Кулешова. Корректор Е.Ю. Глотова.
Переводчик М.В. Воробьева. Дизайн Е.И. Кардаш.
Технический редактор А.В. Володина.
Подписано в печать 20.08.2014. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 18,27. Усл. печ. л. 21,7. Тираж 500 экз.
Зак. № 261.

Адрес редакции: 634003, Томск-3, пл. Соляная, 2, тел. 65-37-61, e-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск-3, ул. Партизанская, 15

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

Tomsk State University of Architecture and Building

V E S T N I K

OF TOMSK STATE UNIVERSITY
OF ARCHITECTURE AND BUILDING

№ 4 (45) 2014

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building» is included in the list of the peer reviewed scientific journals and editions published in the Russian Federation. The main results of PhD and DSc theses obtained in construction and architectural field studies should be published in this journal. The journal was approved by the decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science.

Decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia, 17 June, 2011

The electronic version of the journal is available at http://www.elibrary.ru

Scientific Edition
VESTNIK of TSUAB № 4 – 2014
ISSN 1607-1859

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.

Editors: T.S. Volodina, E.A. Kuleshova, E.Yu. Glotova
Translator: M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash
Technical editor: A.V. Volodina
Passed for printing: 20.08.2014. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman
Published sheets: 18,27. Conventional printed sheets: 21,7. Print run: 500 copies
Order N 261.

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk
Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003

С О Д Е Р Ж А Н И Е

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ВНЕ РУБРИКИ

C O N T E N T S

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS,
SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 72.036

ПОЛЯКОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. архит., доцент,
polyakov.en@yandex.ru
КАРЗОВА ЕЛИЗАВЕТА ЕВГЕНЬЕВНА, студентка,
karzova_liza@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

«ОРГАНИЧНОЕ» НАПРАВЛЕНИЕ В АРХИТЕКТУРНОМ НАСЛЕДИИ АЛВАРА ААЛТО

Статья посвящена «органичным» аспектам в творческом наследии финского архитектора Алвара Хуго Хенрика Ааалто (фин. *Alvar* Hugo Henrik *Aalto*, 1898–1976 гг.). Рассмотрены наиболее характерные приемы визуальной взаимосвязи его построек с окружающим ландшафтом: рельефом местности, растительностью, водными источниками. Показаны варианты использования в его объектах естественных строительных материалов (дерево, камень, кирпич, медь), возможностей естественного освещения. Дано сравнение стилистических особенностей построек А. Ааалто с произведениями некоторых его современников, в числе которых Франк Ллойд Райт – один из создателей «органического» направления в современной архитектуре.

***Ключевые слова**:* «органическая» архитектура; Алвар Ааалто; проекты жилых и общественных зданий; визуальная взаимосвязь с ландшафтом; природные строительные материалы; естественное освещение внутреннего пространства.

EVGENII N. POLYAKOV, PhD, A/Professor,
polyakov.en@yandex.ru
ELIZAVETA E. KARZOVA, Student,
karzova_liza@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

‘ORGANIC’ TENDENCY IN ALVAR AALTO ARCHITECTURAL HERITAGE

This article is devoted to ‘organic’ aspects of architectural heritage of Finnish architect Hugo Alvar Henrik Aalto (1898–1976). The most characteristic methods of visual reciprocal connection of his projects with surrounding landscape are presented, i.e. relief, plants, water springs. The use of natural building materials (wood, stone, brick, copper) in construction is shown as

well as possibilities of natural lighting. Stylistic features of architectured by A. Aalto are compared with masterpieces of his contemporaries. Among them is F.L. Wright, one of originators of 'organic' tendency in modern architecture.

***Keywords**:* 'organic' architecture; Alvar Aalto; projects of civil and public houses; visual reciprocal connection; natural building materials; natural lighting.

К концу двадцатых годов XX столетия в архитектуре Запада сложилось два альтернативных концептуальных направления. Первое из них – конструктивизм, функционализм. За основу здесь было взято комбинирование простейших геометрических объемов из новейших строительных материалов (стекло, железобетон, металлические профили). Пионерами данного направления были В. Гропиус, Л. Мис ван дер Роэ, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), советские конструктивисты. Второе направление – «органическая» архитектура. Оно базировалось на использовании в постройках пластичных криволинейных поверхностей, напоминающих природные, на поиске новых путей гармоничной взаимосвязи архитектуры и окружающей природы. Основоположниками этого направления были скульптор Г. Грино, архитекторы Л.Г. Салливан, Ф.Л. Райт и Х.А.Х. Аалто.

Творчество Алвара Аалто анализировалось нами в статье [1]. Было выявлено два самостоятельных направления в творческом наследии финского мастера – «органическое» и «органичное». В процессе подготовки к LX студенческой научно-технической конференции Томского государственного архитектурно-строительного университета (24 апреля 2014 г.) Е.Е. Карзовой был собран дополнительный материал по этой тематике и более подробно рассмотрено первое из этих направлений – «органическое». Сделанный ею доклад на конференции вызвал неподдельный интерес аудитории, был отмечен дипломом II степени и рекомендован к публикации. Поэтому будет резонно более подробно рассмотреть здесь второе направление в творческом наследии Алвара Аалто – «органичное».

«"Органичное" – значит существенное, внутреннее, целостность в философском смысле; …где природа материалов, природа назначения, природа всего осуществляемого становится ясной, выступает как необходимость…» [4].

Прежде чем говорить об элементах «органичной» архитектуры в творчестве Алвара Аалто, следует обратиться к истокам, которые питали творчество «волшебника северных лесов» (Р. Бэнем). Это традиции национальной и интернациональной культуры, к которым Аалто никогда не оставался равнодушным: «Финляндия – страна лесов и вод. Одних озер в ней более 80 тысяч. В такой стране люди искони могли находиться в постоянной связи с природой. …Каждый у нас может жить у воды, на берегах бесчисленных озер, и наслаждаться красотой сосновых лесов и свежестью вод…» [2, с. 40].

В народных традициях финской архитектуры стремление защитить, изолировать внутреннее пространство здания от холода и избыточной влаги всегда сочеталось с желанием максимально осветить помещение лучами скупого северного солнца. Активное взаимодействие ландшафта, здания и наполняющих его предметов – неотъемлемая черта финской архитектурной школы. Конечно, Алвар Аалто хорошо знал и очень ценил народные традиции финского зодчества: «Когда бываешь в старых церквах или изучаешь кре-

стьянскую постройку столетней давности, ловишь себя на том, что ты совершенно захвачен эмоциональным звучанием этой архитектуры. Возможно, ты покорен живой поверхностью, хранящей следы ручной обработки, искусной чистотой форм, теми простыми линиями, которые столь созвучны нашему ландшафту… Трезвое понимание прошлого нашей страны – наша сила, ибо отныне никакой европейский стиль, никакая теория Морриса или Ван де Вельде не увлекут нас в свою пучину. Видя, как в былые времена наши мастера умели… оставаться верными себе, мы можем с открытыми глазами воспринимать влияние и старой Италии, и старой Испании, и новой Америки. Наши предки всегда будут нашими наставниками…» [2, с. 19–21]. Однако, восторгаясь народными традициями в архитектуре, Аалто не копировал их.

Многое повидав в творческих поездках, Аалто использовал в своих произведениях лучшее из увиденного: «Осматривая постройки финского архитектора с их внутренними двориками и амфитеатрами открытых аудиторий, невольно вспоминаешь памятники античного зодчества. Многие его работы навеяны образцами итальянских средневековых городов, а волнообразные изгибы поверхностей стен напоминают динамичные фасады сооружений барокко…» [3, с. 183].

Так же, как и Ф.Л. Райт, А. Аалто внимательно изучал архитектуру и искусство стран Востока, особенно Японии: «Существует культура, издавна проявлявшая деликатность по отношению к личности. Я имею в виду японскую культуру, которая, несмотря на ограниченный набор материалов и форм, привила людям виртуозное умение изменять среду и создавать новые комбинации едва ли не ежедневно. Огромная любовь японцев к цветам, растениям, к природным материалам являет собою уникальный пример. Связь с природой, постоянное наслаждение ее разнообразием формирует образ жизни, с которым несовместимо существование формы ради формы…» [2, с. 25]. Бережное отношение к природе и особенно чуткое понимание свойств материалов сближают японское искусство с творчеством самого Аалто. Однако финский зодчий всегда оставался самим собой, отстаивал свое право на индивидуальность. Этим он отличался от утонченных мастеров древнего и средневекового Востока с их мистической философией природы. Будучи знатоком искусства и архитектуры многих народов мира, Алвар Аалто сумел создать свой собственный авторский стиль, который со временем вырос в национальную школу, равную по значению бразильской или японской.

«Органичная» архитектура является чрезвычайно сложным и многогранным явлением, которое нельзя заключить в рамки какого-либо одного стиля. Составные элементы данного направления присущи практически любому стилю, замешанному на здравом смысле и исторической преемственности. Попытаемся сгруппировать основные компоненты «органичной» архитектуры, которые ясно прослеживаются в творчестве Алвара Аалто:

1. Визуальная связь здания с окружающей природой.

2. Использование естественных строительных материалов и конструкций (дерево, камень, медь).

3. Широкое использование возможностей естественного (солнечного и лунного) освещения.

Рассмотрим все эти направления в творческом наследии финского мастера в перечисленной последовательности.

1. Приемы взаимосвязи здания с окружающей природой

Данный раздел будет логично разбить на ряд самостоятельных подразделов, поскольку А. Аалто подходил к решению этой проблемы всесторонне:

– приемы взаимосвязи зданий с элементами ландшафта (деревья, скалы, водные источники);

– учет особенностей рельефа местности;

– «открытость» планировочной структуры зданий во внешний мир, «перетекание» природного окружения в интерьер.

1.1. Взаимосвязь зданий с элементами ландшафта

В проекте «Экспериментальный город» (1940 г.) финский зодчий предложил идею гармоничного «вписывания» групп жилых и общественных зданий в свободные пространства между лесными массивами, которые в конечном итоге образовали своеобразный «зеленый каркас». Эта идея была реализована в целом ряде градостроительных работ мастера – генеральных планах рабочих поселков в Сунила, промышленного района Кауттуа, комплекса Политехнического института в Отаниеми, городов Рованиеми и Иматра. Связь между жилыми комплексами здесь осуществлялась посредством автомобильных и водных дорог. Все жилые поселения, вмещающие до трех тысяч человек, общественные и торговые здания, жилые особняки и дома средней этажности располагались среди леса. В Советском Союзе подобная практика нашла воплощение в архитектуре академгородков. Размеры построек здесь всегда были увязаны с высотой деревьев и кустарников. Стены домов окрашивались в светлые тона, чтобы на их фоне выгоднее смотрелись древесные стволы и кроны. Нередко здания и деревья менялись ролями – либо здание служило фоном для отдельных деревьев (солитеров), либо лесной массив эффектно подчеркивал особенности силуэта той или иной постройки.

Классическим примером органичной взаимосвязи здания с природой стала ***целлюлозная фабрика в Суниле (1936–1939 гг.).*** Алвар Аалто настоял, чтобы красновато-коричневая гранитная скала, на которой разместились промышленные постройки, была сохранена. Она очень эффектно сочетается с белой фасадной «лентой» склада, разместившейся у самой кромки воды, и кирпичными массивами главных цехов фабрики. Здесь явно прослеживается историческая аналогия с заупокойным храмом фараонессы Хатшепсут в Дейр-эль-Бахри (XVI в. до н. э.), в котором белые колоннады террас и портиков гармонично дополнены темно-красным фоном скального массива Ливийского нагорья.

В активе Аалто также имеется проект, в котором здание эффектно дополняется панорамой природного водоема. Это решение нового городского центра Хельсинки (1959–1964 гг.). Согласно замыслу Аалто, водное зеркало залива Тёёле и его береговая линия должны были стать композиционным фоном для градостроительного ядра финской столицы. Панорама городского центра нависает над гладью залива, отражается в ней и как бы «скользит» по ее поверхности. По мнению автора, вода создает «двойной архитектурный эффект, разно-

видность северной Венеции». Первым сооружением, возведенным на берегу залива Тёёле, стал дворец «Финляндия» (1967–1971 гг.) (рис. 1).

Рис. 1. Дворец «Финляндия». Хельсинки (1967–1971 гг.)

Огромное здание, облицованное белым каррарским мрамором, черным гранитом и медью, напоминает парусный корабль, отраженный в водном зеркале. Если замысел Алвара Аалто будет реализован полностью, набережную столицы Финляндии украсит целая эскадра аналогичных «зданий-кораблей» (рис. 2).

Рис. 2. Дворец «Финляндия». Хельсинки. Современное состояние

1.2. Учет особенностей рельефа местности

Первые опыты по использованию рельефа местности в архитектуре были предприняты Аалто при строительстве ***жилых террасных домов в промышленном районе Каутуа (1938–1940 гг.)***. Аалто разработал генеральный план и проект застройки поселка, а также проектировал жилые дома для рабочих, общественные здания. Каждый дом в этом комплексе как бы «опрокинут» на бок и «рассыпается» на отдельные ступеньки квартир. То есть каждый этаж, превратившийся в автономную жилую ячейку, получил выход на персональную природную террасу. Это обеспечило обитателям всех жилых ячеек удобную связь с природным окружением. Размещение подобных зданий на

довольно крутом склоне также избавило их от лестничных клеток и лифтовых шахт, на 12 % увеличив полезную кубатуру. Подобный прием широко использовался еще на минойском Крите, что говорит об исторической преемственности творчества Аалто (рис. 3–5).

Рис. 3. Терраса жилого дома в Кауттуа (1938–1940 гг.)

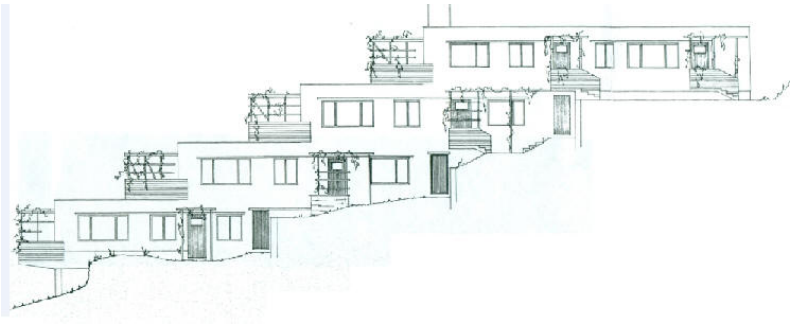


Рис. 4. Проект дома на рельефе в Кауттуа (1938–1940 гг.)

Рис. 5. Жилые террасные дома на рельефе в Кауттуа (1938–1940 гг.)

На участке, где в 1952 г. был возведен ***центр поселка Сяюнятсало***, также удалось сохранить моренные массы земли. В результате поверхность центральной площадки комплекса оказалась на целый этаж выше окружающей застройки. Это позволило создать своеобразный дворик-террасу, на которую можно было подняться по двум лестницам. Одна из лестниц – парадная – примыкает непосредственно к зданию поселкового совета и облицована серым гранитом (рис. 6, *а*). Другая же, находящаяся на противоположной стороне дворика, решена в виде земляных ступеней, поросших травой и цветами (рис. 6, *б*). Своими очертаниями ступени как бы повторяют естественный профиль склона.

а

б

Рис. 6. Центр поселка Сяюнатсало. Финляндия (1952 г.):
а – гранитная лестница; *б* – земляная лестница

Травяные ступени из земли, оставленной от рытья фундаментов, были сделаны также в ***г. Сейняйоки (1959–1965 гг.)***. Эти зеленые террасы необычайно обогатили территорию города и придали ей особую интимность и теплоту (рис. 7).

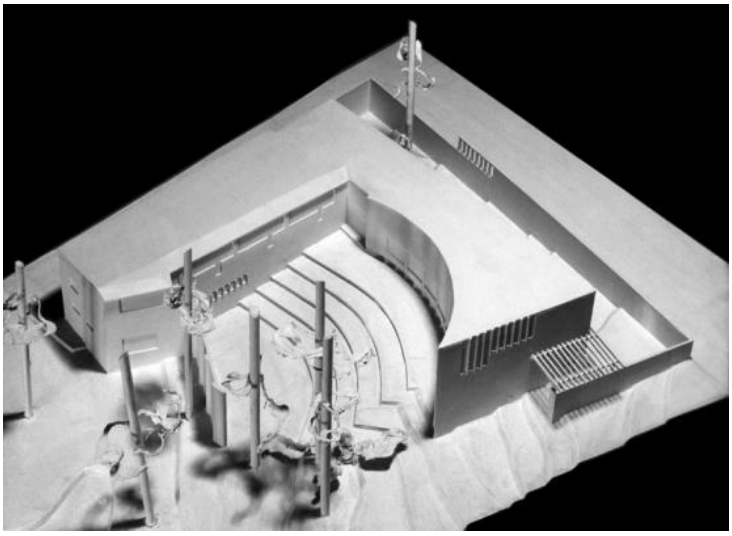
Рис. 7. Застройка г. Сейняйоки. Финляндия (1959–1965 гг.)

Однако наиболее показательным примером органичного использования рельефа является здание ***мастерской Алвара Аалто в Мункниеми (1955 г.)***. Об этом прекрасно сказал Ёран Шильдт, один из сотрудников финского зодчего: «Наиболее значительным примером понимания Аалто “современности” представляется нам замысел, легший в основу композиции его архитектурного бюро, строения которого окружают естественный амфитеатр, образованный рельефом участка. Аалто… обогатил свою задачу фантазией, представив себе, что будто бы на этом месте сохранились развалины античного театра – полукруглой ступенчатой раковины, – которые нужно непременно сохранить. По контуру этого полукружья Аалто и расположил строения своего бюро. Конечно, этот амфитеатр вполне можно рассматривать как внутренний двор, форма которого удобна для того, чтобы летом читать лекции своим молодым сотрудникам под открытым небом.

Зимой же амфитеатр терял свое значение и мог только “радовать глаз”. Действительно, пространство, открывающееся взору из окон бюро, организовано исключительно гармонично. Но Аалто не был бы самим собой, если бы не сумел оправдать существование этого амфитеатра и в пору зимней стужи. И в самом деле – из окон личной мастерской Аалто, большого, дугообразного

в плане зала, прекрасно видны кадры, проецируемые на белую стену из другой стороны двора. И лектору, и его слушателям, находящимся в тепле, нет дела до тридцатиградусного мороза, царящего в амфитеатре между ними и экраном…» [2, с. 212, 213] (рис. 8).

а



б

Рис. 8. Мастерская А. Аалто в Мункиниеми (1955 г.):
а – макет; *б* – фрагмент интерьера

1.3. Варианты планировки зданий, «перетекание» ландшафта в интерьер

Проблема взаимосвязи здания с природным окружением интересовала многих зодчих, даже не считающих себя сторонниками «органичного» направления в архитектуре. По крайней мере, три принципа «новой архитектуры» Ле Корбюзье из пяти были направлены на решение этой проблемы – подъем первого этажа над уровнем земли на столбах, устройство зеленых насаждений на плоской или ступенчатой кровле, большие площади ленточного остекления. Л. Мис ван дер Роэ и Ф. Джонсон довели эту идею до полного

абсурда. Проекты их «стеклянных домов» 1946–1949 гг. превратили жилой дом в своеобразный «аквариум», внутреннее пространство которого полностью открыто взорам любопытных прохожих. Рассмотрим эти проекты.

В 1946–1951 гг. немецкий архитектор-модернист Людвиг Мис ван дер Роэ (1886–1969) в местечке Плейно (штат Иллинойс, США) строит «Стеклянный дом» (Фарнсуорт-Хауз) для Эдит Фарнсуорт – известной в Чикаго женщины-хирурга. Дом имеет элегантный белый каркас, остекленный по периметру. Он стоит на прямоугольной плите, опирающейся на сваи. Стеклянные стены отделены от несущих стоек, подчеркивая тем самым эфемерность конструкции. Дом составляет единое целое с природой, «растворяется» в ней. Здесь нет перегородок. Дом состоит из единственной комнаты, полностью раскрытой в окружающий пейзаж. Единственным замкнутым объемом является блок санитарного узла и подсобного помещения. Фарнсуорт-Хауз объявлен памятником архитектуры штата Иллинойс и в нем устроен музей (рис. 9).

а

б

Рис. 9. Фарнсуорт-Хауз (The Farnsworth House) (1946–1951 гг.):
а – общий вид; *б* – фрагмент входной части

Среди многочисленных вариаций на эту тему можно отметить проект Филипа Джонсона (1906–2005), американского архитектора и художественного критика (рис. 10).

а

б

Рис. 10. «Стеклянный дом» Ф. Джонсона в Нью-Канаане (Philip Johnson's Glass House) (1949 г.):
а – общий вид; *б* – интерьер

Его проект «Стеклянный дом» в Нью-Канаане также имеет прозрачное ограждение. Жизнь хозяина внутри этого экстравагантного дома, кроме зоны ванной, также выставлена на обозрение прохожим. Конструкция каркаса опирается на восемь стальных колонн. Здесь явно гипертрофирован прием средневекового китайского зодчества – устройство прозрачных бумажных ширм и размещение живописных изображений природы на поверхности глухих

стен. «Стеклянный дом» Ф. Джонсона также обрел широкую известность во всем мире и охраняется правительством США как историческая ценность.

В некоторых из своих построек Алвар Аалто также использовал сплошное остекление наружных стен. Природный пейзаж при этом превращался в своеобразное живописное полотно, созданное самой природой. Зодчий широко использовал в своих проектах балконы, лоджии, террасы и прочие средства пространственной связи зданий с природным окружением. В этом плане показателен ***жилой дом в квартале Ганза (Западный Берлин, 1956–1957 гг.)*** (рис. 11).

Рис. 11. Жилой дом на Hansaviertel. Западный Берлин (1956–1957 гг.)

Во всех квартирах этого дома пространство холла было трансформировано в просторную комнату-атриум, связанную с внешним пространством квартиры. Получилось большое, открытое воздуху и свету пространство – своеобразный внутренний дворик-перистиль, вокруг которого группировались остальные помещения квартиры.

Алвар Аалто использовал и более кардинальные средства «приглашения» природы в дом. Например, он устраивал открытый дворик-патио, вокруг которого размещались основные помещения здания (павильон в Париже, вилла «Майреа», центр в Сяюнятсало и др.).

Тему дворика-патио архитектор многократно варьировал в самых разнообразных ситуациях – от градостроительных комплексов до индивидуальной жилой ячейки. Природа проникает в дома Аалто не только через окна-витражи и открытые дворики. В преобразованном виде она царит в самом интерьере. Здание и ландшафт объединяются за счет «перетекания» пространств интерьеров, за счет замены острых углов плавными закруглениями, за счет волнообразных потолков и стен, мягких изгибов деревянной мебели, светильников и ваз.

2. Использование естественных природных материалов

Бережное отношение к строительным материалам природного происхождения роднит творчество А. Аалто и Ф.Л. Райта. По их общему глубокому убеждению, использование местных строительных материалов неразрывно связывает здание с той средой, в которой оно возведено. Дом становится гармоничным «дополнением» и «продолжением» природного ландшафта. Известно множество высказываний Аалто на эту тему: «Дерево само по себе обладает красотою рисунка, изысканной текстуры и таких оттенков цвета… которую резьба, вероятнее всего, разрушает. …Красота дерева заключается в его качествах… Выявляйте в ваших проектах природу дерева, гипса, кирпича или камня. Только в естественном виде эти материалы красивы и приятны. Никакая отделка не улучшит их, если разрушена их натуральная фактура…» [4, с. 14].

Алвар Аалто всегда предпочитал естественные материалы (дерево, кирпич, красную медь) всем прочим. Он, например, никогда не использовал в своих проектах алюминий и пластмассы, утверждая, что они сначала должны пройти проверку временем. В проектах Аалто также крайне редко встречаются открытый бетон и сплошное остекление. Используемые им естественные материалы финский зодчий четко разграничивает на «конструктивные» и «отделочные».

2.1. Дерево

Хуго Алвар Хенрик Аалто родился 3 февраля 1898 г. в городке Куортане (Центральная Финляндия) в семье лесника. Любовь к дереву, видимо, перешла к нему по наследству. «Как каждый мастер, Аалто тяготеет к определенным средствам выразительности. И если имя Ле Корбюзье связано с железобетоном, Мис ван дер Роэ – с металлом, то имя Аалто ассоциируется с деревом…» [3, с. 132]. Для Аалто дерево было материалом скорее биологическим, чем строительным. В архитектуре деревянных карельских изб, например, он ценил «одноматериальность» и не мог согласиться с тем, чтобы дерево играло в конструкции нейтральную роль «заполнителя стены», как в подавляющем большинстве средневековых построек. По мнению мастера, дерево обязано предельно раскрывать свои пластические качества, гибкость, поскольку оно является «живым материалом из растущих волокон, подобных мускулатуре человека» [2, с. 12]. О значении дерева в современном строительстве Аалто писал следующее: «Легкость, с какой дерево поддается механической обработке, обычно служит предпосылкой создания из него различных архитектурных форм… Важным обстоятельством для нас является богатый выбор сортов древесины, а на основе выбора – самые широкие возможности в формообразовании… Биологические свойства дерева, его слабая теплопроводность, органическая близость человеку и природе, то приятное чувство, которое испытываешь, соприкасаясь с ним… возможность самой разнообразной отделки его поверхности – все это сохраняет за деревом господствующее положение в оформлении интерьера. …По всей видимости, дерево и впредь будет сохранять свое значение как материал глубоко человечный, составляющий нашу жизнь. Возможности дерева далеко еще не исчерпаны…» [2, с. 44].

В интерьере ***виллы «Майреа»***, построенной А. Аалто для супругов Майре и Гарри Гулликсен (***Ноормаркку, 1938–1939 гг.***), главенствует обработанное дерево – пол из букового паркета, подвесной потолок из сосновой рейки, обернутые берестой металлические детали каркаса и пр.: «Неправильный ритм бамбуковой шторы входа перекликается со свободным расположением сосен в лесу – схема, повторенная в ограждении внутренней лестницы. Одна и та же форма плана, напоминающая неправильные очертания типичного финского озера, повторена в кабинете, навесе над входом в бассейн…» [5, с. 295]. При строительстве этого дома архитектору была предоставлена полная свобода. Он не преминул ей воспользоваться и соединил в одном проекте, казалось бы, несоединимые вещи – финскую национальную, классическую и модернистскую традиции (рис. 12).

а

б

Рис. 12. Вилла «Майреа» в Ноормаркку. Финляндия (1938–1939 гг.):
а – общий вид; *б* – интерьер

Связующим элементом между ними стали любимые Аалто природные материалы. Потолок большой гостиной подшит сосновыми рейками, колонна

из стальной трубы отделана берестой. К этому следует добавить обилие цветов, комнатных декоративных растений, кондиционированный воздух с запахами соснового леса, поступающий сквозь решетку потолка. Как видно, набор средств объединения зданий с окружающей природой у Аалто был достаточно разнообразен.

Ранее мы уже останавливались на опытах Аалто с пластическими деревянными конструкциями («волнообразными стенами»), с использованием дерева в качестве отделочного материала. Поэтому перейдем к другой группе материалов, также получивших широкое применение в постройках Аалто – естественному камню, кирпичу.

2.2. Естественный камень, кирпич

Изучению конструктивных и декоративных возможностей кирпича Алвар Аалто посвятил немало времени. В творчестве архитектора различают два периода: довоенный «белый» (фасады имели в основном светлые оштукатуренные стены) и послевоенный «красный» («кирпичный») период, на который и пришлась постройка экспериментальной дачи.

Летний дом в Мууратсало, построенный в 1953 г., стал опытной лабораторией, в которой он экспериментировал с различными вариантами кирпичной кладки: «Комплекс построек включает архитектурную мастерскую… и небольшой экспериментальный центр, где могут проводиться различные опыты и где близость природы вдохновляет на создание новых форм… Дом отличается от обычных построек тем, что в нем нет повторяющихся форм, единого масштаба или единой конструкции. Так, например, стены закрытого внутреннего дворика разделены на 50 фрагментов для изучения качеств керамических материалов, размеров кирпича, различных приемов кладки, свойств разнообразных поверхностей. В эксперименты с формами одновременно включены и испытания материалов на прочность, которые изо дня в день проводятся под непосредственным наблюдением архитекторов. То же можно сказать и о покрытии внутреннего дворика, где из года в год на различных участках испытываются различные виды покрытий, начиная с исследования кирпича и камня и кончая изучением эстетических и защитных качеств декоративных растений и мхов…» [2, с. 140] (рис. 13).

Здание стоит на склоне горы. Как и в своем доме-студии в пригороде Хельсинки, Аалто разделил пространство на жилую и рабочую зоны. Здесь три спальни, гостевой домик и баня, отапливаемая по-черному. Пространство организовано вокруг небольшого внутреннего дворика, где есть место для костра и прочих удовольствий на природе. Подобные дворы мастер использовал и в других своих проектах. Во дворе мастерской он занимался тем, что придумывал типы кирпича и разные способы его кладки: «Я также исследую то впечатление, которое производит сочетание растений и кирпичной кладки стены. Всегда поражает, когда видишь ползущий по стене желтый лишайник – совсем немного растений, и камень оживает…» [2, с. 43].

Эксперименты Аалто с каменными конструкциями привлекают своим размахом и своеобразием тематики исследований:

– строительство зданий без фундамента;

– эксперименты с нерегулярной сеткой колонных опор;

– поиски форм стандартного кирпича для монтажа стен криволинейной конфигурации;

– изучение цветовой гаммы кирпича и пр.

«Красный» период в творчестве Аалто продолжался с 1948 г. (общежитие в Кембридже) по 1956 г. (ДК рабочих в Хельсинки). Наиболее значительными «этапными» постройками данного периода являются следующие:

– общественный центр в Сяюнятсало, 1950–1952 гг.;

– летний дом архитектора в Мууратсало, 1953 г.;

– пенсионное управление в Хельсинки, 1952–1956 гг.

а

б

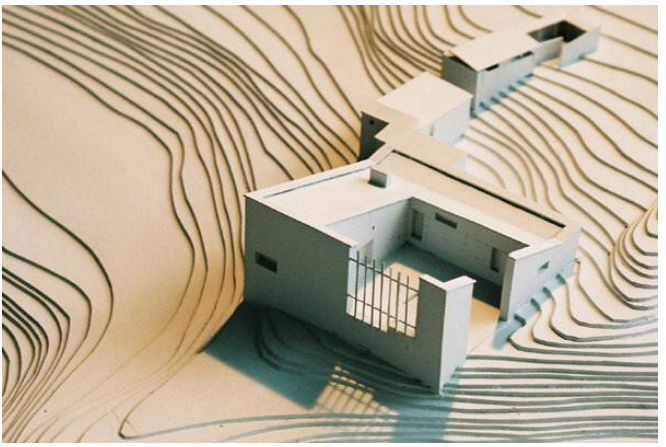


Рис. 13. Летний дом А. Аалто в Мууратсало (1953 г.):
а – внутренний дворик; *б* – макет дома

В 60-х гг. Аалто обращается к кирпичу лишь эпизодически. Например, в комплексе Политехнического института в Отаниеми (1961–1964 гг.) красный облицовочный кирпич соседствует с серым гранитом и белым мрамором. Интересной особенностью творческого почерка Аалто является и то, что он стремился, по примеру Ф.Л. Райта, вводить кирпичную облицовку в интерьер. Его постройки «красного» периода, как правило, двухцветные – красные сна-

ружи и «неожиданно светлые» внутри. Исключением является интерьер ратуши в Сяюнятсало да, пожалуй, помещение распределительного зала университета в Ювескюля (1952–1957 гг.).

Занимаясь проектной практикой во многих странах мира, Аалто отнюдь не стремился переносить финские национальные строительные традиции на чужеземную почву. В Швейцарии он строил иначе, чем в Германии, США или Италии. В иностранных проектах он предпочитал использовать местные строительные материалы – все, что оказывались в данный момент под рукой. Это порой затрудняет «узнаваемость» построек Аалто. Например, жилой дом в Бремене (1958–1962 гг.) облицован светлыми бетонными и асбоцементными панелями, а культурный центр в Вольфсбурге (Германия, 1959–1962 гг.) – бело-голубым каррарским мрамором и памирским сиенитом.

Обогащение палитры строительных материалов, внимательное изучение их эстетических качеств во время зарубежных поездок, несомненно, помогли мастеру в поисках образного и цветового решения зала конгрессов «Финляндия» в Хельсинки (1971 г.). В облицовке интерьеров зала нашли применение различные породы дерева, керамика, белый каррарский мрамор. На фасадах – белый мрамор, черный гранит и медь.

2.3. Красная медь

Особо следует выделить третий по значению материал, который предпочитал применять в своих постройках Алвар Аалто. Это – красная медь, которая со временем покрывается черно-зеленой патиной. Финский зодчий ценил медные кровли и переплеты за особую «теплоту», контрастную «холодному» алюминию. Медь в роли облицовочного материала была очень популярна во времена финского национального романтизма. После Второй мировой войны производство листовой красной меди превысило потребность отечественного машиностроения и энергетики, чем успешно воспользовались финские зодчие и строители. Несомненно, их привлекло разнообразие цветовых нюансов в окраске этого металла: «В ясный день золотисто-бурая медь крыш отражает небо и приобретает серебристо-холодный оттенок, больше голубой, чем коричневый. Вечером, когда солнце за облаками, материалы как бы вбирают в себя цвет, он становится не ярким, но более глубоким, насыщенным… Зимой красный кирпич контрастирует с белым снегом и небом, так как медные крыши и земля покрыты снегом, а деревья лишены листвы…» [3, с. 141, 142].

3. Естественное освещение

Стремление максимально использовать скупое северное солнце для инсоляции жилищ во многом определило традиционную специфику финского зодчества (большие размеры оконных проемов; светлая поверхность деревянных облицовок в интерьере, хорошо отражающая солнечные лучи; темная окраска фасадов зданий, активно поглощающая солнечное тепло; световые «ловушки» в конструкции кровли и т. п.). В своих работах Алвар Аалто реализовал множество новинок в области «световой архитектуры», которые касались как общей ориентации зданий, так и конструирования различных технических приспособлений.

Его первым опытом в данной области стал ***туберкулезный санаторий в Паймио (провинция Варсинайс-Суоми, 1929–1933 гг.)***.

В длинном вытянутом основном крыле санатория расположены комнаты пациентов, которые через промежуточный переход связаны со вторым основным блоком терапевтических учреждений и общих помещений, а также с задним зданием, где размещены кухня, узел отопления, гаражи и различные технические устройства.

Как известно, в подобных заведениях больным противопоказаны прямые солнечные лучи, но предписано максимальное количество свежего воздуха. Поэтому Аалто расположил основные корпуса санатория веером. В длинном семиэтажном корпусе «А» ряд двухместных палат выходит на юго-восток. В палаты, выходящие на балконы и коридор, солнечные лучи проникают с раннего утра до послеполуденного времени, причем от прямых лучей больных защищают жалюзи. С восточной стороны корпуса, выходящего главным фасадом на юг, расположен солярий с верандами на каждом этаже для лечения свежим воздухом. Все остальные корпуса ориентированы с учетом реальной потребности в естественном освещении: «Длинные и узкие высокие корпуса, окрашенные в светлые тона, с подчеркнутыми горизонталями балконов на южных фасадах и узкими окнами на северных производят большое впечатление. Окружающая природа очень гармонирует… с санаторием, корпуса которого как бы стремятся вверх к солнечному свету и свежему воздуху…» [6, с. 112].

Аалто апробировал в этом сооружении массу архитектурных новинок: «Из других помещений санатория следует упомянуть такие большие залы, как столовая и рабочий зал, которые… ориентированы прямо на юг. Эти помещения с южной стороны имеют большую высоту, чем с северной, поэтому на всю глубину облучаются южным солнцем. Для защиты от излишнего солнечного облучения перед окнами установлены карнизы. Комнаты отдыха расположены так, что часть комнат в течение всего дня остается в тени, а часть освещена солнцем, так что здесь имеется возможность выбора…» [Там же] (рис. 14).

Рис. 14. Санаторий в Паймио (1929–1933 гг.)

Опыт планировки, приобретенный при строительстве санатория, Аалто реализовал и в других проектах. Веерообразная структура жилого дома в комплексе «Нойе вар» (г. Бремен, 1958–1962 гг.) позволила сделать одно- и двухкомнатные квартиры трапециевидными, раскрывающимися наружу к свету. К основанию «веера» примыкает прямоугольная «пластина», в которую включены лифты и лестницы. Жилой фасад этого оригинального здания очерчен «вибрирующей» кривой, эффектно дополненной с обратной стороны ортогональной пластиной. Многоугольные пространства комнат, красиво сформированные сами по себе, оказались неудобны в эксплуатации небольших квартир. Однако эти частичные неудобства в планировке квартир с лихвой окупаются за счет улучшения их естественной инсоляции (рис. 15).

Стремясь облегчить эксплуатацию жилых «многоугольных пространств», Аалто, строя подобный дом в Люцерне (1966–1968 гг.), немного «смягчил» веерную схему. Однако острота скульптурной пластики здесь была безвозвратно утеряна.

а

б

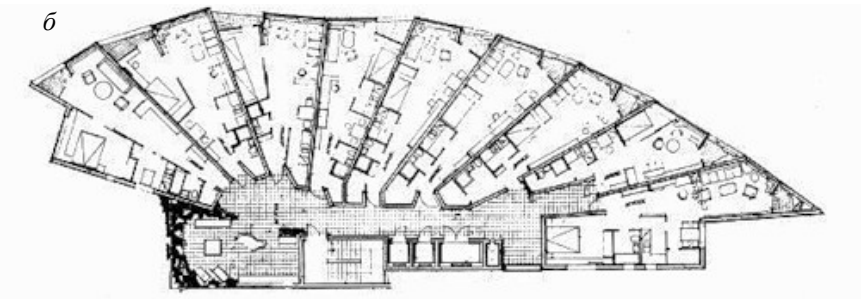


Рис. 15. Многоэтажный дом из жилого комплекса «Нойе вар». Бремен (1958–1962 гг.):
а – общий вид; *б* – план

В читальных залах ***библиотеки г. Выборга (1930–1935 гг.)*** Аалто сумел запроектировать такую систему естественного освещения, при которой естественный свет, проникающий в помещения через равномерно расположенные на потолке круглые фонари, создает оптимальные условия для чтения. 57 отверстий высотой 1,8 м имели конусообразную форму. Высота конуса такова, что солнечный луч, падающий под углом 52° и ниже, не может попасть в здание беспрепятственно. Потолок служит также источником тепла (система тепловых панелей). Он играет роль «солнца», рассеянный свет которого не создает тени (рис. 16).

а

б

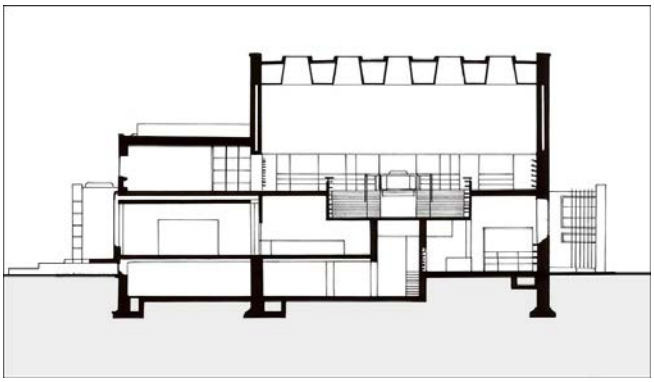


Рис. 16. Библиотека г. Выборга (1930–1935 гг.):
а – читальный зал; *б* – поперечный разрез по лестнице

В своих постройках Аалто не отказывался и от технических новинок – асимметричных фонарей-экранов, ламп дневного освещения, искусно вмонтированных в конструкцию фонарей или в промежутки между ними, декоративных светильников, скрытых источников света (по примеру Ф.Л. Райта) и др. Умение приспосабливать особенности местного климата для повышения комфортности среды обитания человека является высшим проявлением мастерства зодчего. Прием создания аналога небесного свода нашел широкое применение в творчестве как самого Аалто, так и многих других архитекторов Финляндии.

Он нашел в природе те новые черты, которые можно было использовать в архитектуре, и основной его целью при проектировании становится достижение единства пейзажа, ландшафта, растительности и самого здания.

В заключение акцентируем некоторые моменты, которые позволяют отнести творчество финского зодчего к «органическому» направлению в архитектуре Запада. Так же, как у Франка Ллойда Райта, в творческом наследии Алвара Аалто ясно прослеживаются два направления – «органическое» и «органичное».

Первое связано с использованием в объемно-пространственной структуре здания различных «природных» имитаций, аналогий. Если Райт иногда использовал в своих постройках детали, напоминающие природные формы (грибовидные колонны, сотообразные схемы жилых ячеек и т. п.), то у Аалто подобных имитаций практически не встречается. Или они настолько скрыты, замаскированы, что, как и все загадочное, невольно порождают у зрителя самые разнообразные ассоциации и метафоры. Во многом здесь «виноват» принцип «волнообразной стены», который Аалто всячески варьировал в деревянных, каменных кирпичных конструкциях и материалах. «Волну» мы встречаем и в дизайне мебели, и в конструкции навесных потолков, и в пластике фасадов построек. Стремление к гармоничному единству архитектуры с финским пейзажем породило схожесть многих произведений Аалто с природными формами. Реализации этого подхода и моделированию зданий помогли многолетние эксперименты с традиционными финскими строительными материалами – деревом, камнем и др.

Значительно больший вклад сделан финским мастером в развитие «органичной» архитектуры – второй ипостаси рассматриваемого направления. Здесь уже нет места скульптурным метафорам и аналогиям. Речь идет о более общих, глубинных законах единения природы с произведениями архитектуры. Заслуга Алвара Аалто состоит в том, что он, опираясь на традиции архитектуры многих стран и народов, сумел создать своеобразную творческую школу, занятую поиском приемов достижения этого гармоничного единства. Его постройки не просто удачно сочетаются со скалой, водным источником или группой деревьев. Они находятся с природой в состоянии «перетекающего взаимопроникновения». Причем не только визуального (большие поверхности окон-витражей, открытые дворики), но и «материального» (максимальное использование в интерьерах естественного освещения, природных материалов). Эти творческие принципы являются общими и для Аалто, и для Райта. Но, в отличие от американского зодчего, Аалто много сил и времени уделял научной стороне данного направления, его экспериментальному обоснованию. Понятие «органичное» в применении к архитектуре было для Алвара Аалто более конкретным, чем для Г. Грино, Л. Салливана и Ф.Л. Райта, считающихся признанными теоретиками данного направления в мировой архитектуре. Это доказывают многочисленные высказывания Аалто в области материаловедения, климатологии, дизайна, искусствоведения. Об этом же молчаливо свидетельствует его богатейшее творческое наследие в области архитектуры и градостроительства.

Библиографический список

1. *Поляков, Е.Н.* Элементы органической архитектуры в творчестве Алвара Аалто / Е.Н. Поляков // Реферативный журнал «Архитектура и градостроительство» (отечественный опыт). – 1992. – Вып. 3. – № 891. – 24 с. – Деп. в НИИТАГ.
2. *Аалто, Алвар*. Архитектура и гуманизм: сб. ст.: [пер. с финского] / Алвар Аалто ; ред. А. Гозак. – М. : Прогресс, 1978. – 230 с.
3. *Гозак, А.П.* Алвар Аалто (Мастера архитектуры) / А.П. Гозак. – М. : Стройиздат, 1976. – 176 с.
4. *Поляков, Е.Н.* «Органичное» и «органическое» в творчестве Франка Ллойда Райта / Е.Н. Поляков // Реферативный журнал «Архитектура и градостроительство» (отечественный опыт). – 1990. – Вып. 6. – № 857. – С. 48. – Деп. в НИИТАГ.
5. *Фремптон, К.* Современная архитектура. Критический взгляд на историю развития: [пер. с англ.] / К. Фремптон. – М. : Стройиздат, 1990. – 535 с.
6. *Арнольд, Уиттик.* Европейская архитектура XX века. – Т. 2. Эра функционализма (1924–1933): [пер. с англ.] / Уиттик Арнольд. – М. : Стройиздат, 1964. – 203 с.

References

1. *Polyakov E.N.* Elementy organicheskoi arkhitektury v tvorchestve Alvara Aalto [Elements of organic architecture in Alvar Aalto's creativity]. Arkhitektura i gradostroitel'stvo [Architecture and town planning]. NIITAG Publ., 1992. V. 3. No. 891. 24 p. (rus)
2. *Aalto A.* Arkhitektura i gumanizm [Architecture and humanism]. Ed. A. Gozak. Moscow : Progress, 1978. 230 p. (transl. from Finnish)
3. *Gozak A.P.* Alvar Aalto (Mastera arkhitektury) [Alvar Aalto (Masters of architecture)]. Moscow : Stroyizdat, 1976. 176 p. (rus)
4. *Polyakov E.N.* 'Organichnoe' i 'organicheskoe' v tvorchestve Franka Lloida Raita ['Harmonic' and 'organic' in Frank Lloid Wright creativity]. Arkhitektura i gradostroitel'stvo [Architecture and town planning]. NIITAG Publ., 1990. V. 6. No. 857. P. 48. (rus)
5. *Frampton K.* Sovremennaya arkhitektura. Kriticheskii vzglyad na istoriyu razvitiya [Modern architecture: a critical history]. Moscow : Stroyizdat, 1990. 535 p. (transl. from Engl.)
6. *Wittich A.* Evropeiskaya arkhitektura XX veka [20th century European architecture]. V. 2. Functionalism era (1924–1933). Moscow : Stroyizdat, 1964. 203 p. (transl. from Engl.)

УДК 711.4

СИЛОГАЕВА ВЕРОНИКА ВЛАДИМИРОВНА, аспирант,
silogaevaveronika@gmail.com
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
Украина, 49600, г. Днепропетровск, ул. Чернышевского, 24а

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИНЦИПОВ КОМПЛЕКСНОЙ РЕНОВАЦИИ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ИСТОРИЧЕСКИХ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ Г. ЗАПОРОЖЬЯ)

Планировочная структура г. Запорожья при всей своей линейности неоднородна, агрессивна и хаотична. Актуальность темы обусловлена наличием большого количества промышленных территорий бездействующих заводов, которые зачастую примыкают и сосуществуют с жилой застройкой. Эти территории могут получить более высокую социальную и архитектурную значимость благодаря комплексной реновации, которая могла бы улучшить функционально-планировочные и композиционно-пространственные качества города путем наиболее перспективного использования промышленных территорий. Определить принципы комплексной реновации промышленных территорий с учетом современного состояния промышленности города поможет выявление исторических градостроительных этапов формирования г. Запорожья и анализ их влияния на городскую застройку.

Ключевые слова: градостроительная ситуация; промышленные территории; исторический градостроительный этап; принципы комплексной реновации.

VERONIKA V. SILOGAEVA, Research Assistant,
silogaevaveronika@gmail.com
Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture,
24a, Chernyshevskii Str., 49600, Dnepropetrovsk, Ukraine

PRINCIPLES OF COMPLEX RENOVATION BASED ON HISTORICAL ANALYSIS OF TOWN-PLANNING (ZAPOROZHYE CASE STUDY)

Town-planning in Zaporozhye is inhomogeneous, aggressive and chaotic. The relevance of this problem is conditioned by vast industrial territories of inactive plants that are often joined and coexist with dwelling building. These territories can get a higher social and architectural significance owing to a complex renovation that could improve planning and compositional spatial qualities of cities by the most efficient use of industrial territories. Complex renovation principles of industrial areas can be defined by stages of historical town-planning of Zaporozhye and the analysis of their impact on the town development.

Keywords: town-planning; industrial territories; historical town-planning; complex renovation principles.

Во многих странах самыми распространенными являются промышленные города, южный город Украины Запорожье – это не просто промышлен-

ный город, а уникальный промышленный город. Обычно разные отрасли формируют «цеховые корпорации» городов-центров, где сконцентрирована либо металлургия, либо машиностроение, либо химическая индустрия, либо лёгкая и пищевая промышленность. Экономический потенциал г. Запорожья характеризуется масштабностью и разнообразием отраслей, производств и видов деятельности. Здесь сосредоточено 6,4 % объема промышленного выпуска страны. Запорожье – это четвёртый по величине индустриальный центр Украины с развитым машиностроением, чёрной и цветной металлургией, химической, строительной, пищевой промышленностью, т. е. в Запорожье (по состоянию на 2012 г.) находится 227 промышленных предприятий [1]. Среди них основную долю составляют:

– предприятия машиностроения – 69;

– предприятия металлургии и обработки металла – 36;

– предприятия химической и нефтехимической промышленности – 20;

– предприятия пищевой промышленности – 24;

– предприятия по производству неметаллической минеральной продукции – 22;

– предприятия по производству и распределению электроэнергии, газа и воды – 14.

В то же время Запорожье – это город с богатой историей. Выгодное географическое расположение (город стоит на р. Днепр) и благоприятные природные условия с древности привлекали людей: первые известные поселения в долине у Днепровских порогов относятся к эпохе среднего палеолита (40–100 тыс. лет назад). В месте расположения города заканчивается южный склон Украинского щита, повлекший за собой особенности ландшафта города (большое количество балок и оврагов). На территории города находится остров Хортица – символ формирования запорожского казачества. Запорожская Сечь – это первое политическое формирование со всеми признаками республики на территории Украины [2].

До 1921 г. город Запорожье назывался Александровском благодаря Александровской крепости, заложенной в 1770 г. Характер пространственной организации и планировочные особенности были продиктованы географическим расположением города: удобная оборонительная позиция и легкость доставки строительных материалов. Но до XX в. город был мал, провинциален, не развит. Новым толчком для развития города послужило строительство железной дороги (начало XX в.). Александровск (впоследствии Запорожье) становится транспортным узлом, в городе активно развивается сельскохозяйственная и машиностроительная промышленность. Работают кирпичный завод, лесопилка, водочные заводы, механические мельницы Классена. На рубеже XX в. в Александровске и его окрестностях проживали около 20 тыс. чел. Этот этап развития города, безусловно, важен, т. к. сродни процессу оплодотворения. Но на формирование градостроительной ситуации всего г. Запорожья он не оказал существенного влияния.

Само название «Запорожье» связано с Днепровскими порогами, которые уникальны. Благодаря порогам появился символ индустриализации – ДнепроГЭС. В 20-е гг. XX в. параллельно со строительством мощнейшей гидроэлек-

тростанции набирает обороты и развитие промышленности в городе. В довоенные годы Запорожье становится одним из центров по производству чёрных и цветных металлов, тяжёлой промышленности и электроэнергетики СССР. Это способствует тому, что планировочная структура пролиферирует, и формируется новый тип социалистического города. Запорожье переживает эмбриональный период. Анализируя исторические градостроительные этапы формирования промышленных территорий и их влияние на городскую застройку, можно выделить основные этапы эмбрионального развития Запорожья:

1. Дробление.

Новое Запорожье проектировалось как бы обособленно от исторического центра (старого Александровска). Старый город становился не основой, а лишь автономной единицей цельного градостроительного образования. Строился город по нескольким проектам. Вначале был проект, разработанный в 1928 г. архитекторами В.А. Весниным, Н.Я. Колли, Г.М. Орловым. Проект Шестого поселка предполагал строительство между ДнепроГЭС и промышленной площадкой, где возводились заводы. Поселок был заложен в 10 км от центра старого Александровска (рис. 1). За годы довоенных пятилеток в городе вместе со строительством электростанции было возведено несколько заводов, в частности завод листовых сталей (сегодня Запорожсталь), коксохимический завод, алюминиевый завод, завод ферросплавов, завод инструментальных сталей (теперь Днепроспецсталь).

Рис. 1. Схема г. Запорожья – этап дробление:
1 – ДнепроГЭС; *2* – Шестой поселок; *3* – промышленная площадка; *4* – застройка старого города

Огромную роль в развитии советского авиастроения, в том числе и военного, сыграл расположенный в Запорожье моторостроительный завод (ныне ОАО «Мотор Сич»). Для жилой застройки Шестого поселка были характерны и перетекающие пространства, и четко вычерченная прямоугольная сетка кварталов, и зеленые газоны. План представлял собой символическую для советского градостроительства 20-х гг. линейную схему, направленную в данном случае перпендикулярно производственной зоне Днепрокомбината.

2. Гаструляция (сложный процесс морфогенетических изменений, сопровождающихся размножением, ростом, направленным перемещением; приводит к образованию зародыша) [4].

В 1932 г. под руководством градостроителя И.И. Малоземова был закончен генеральный план Большого Запорожья, и уже существующий как самостоятельное градостроительное образование Шестой поселок вошел в него в качестве пусть одной из основных, но все-таки составляющих. Проектом генерального плана Большого Запорожья предусматривалось создание 7 районов, чтобы в городе могло проживать около полумиллиона человек. Децентрализованная схема города была продиктована сложным рельефом местности и р. Днепр.

Рис. 2. Схема г. Запорожья – этап гаструляция:
——— проспект Ленина; *1* – соцгород; *2* – застройка общегородского центра на Вознесенке; *3* – промышленная площадка; *4* – застройка старого города

Роль основной композиционной оси выполнял протяженный проспект Ленина. Эта главная магистраль была значительно шире других улиц и застраивалась наиболее представительными зданиями. Проспект Ленина объединял в единое целое ряд важнейших городских ансамблей (рис. 2): комплекс гидротехнических сооружений на пл. Ленина, застройку общегородского центра на Вознесенке и центр старого города [3]. Большое внимание уделялось созданию целостного архитектурно-художественного облика города. Промышленная площадка активно растет и развивается. Появляются новые заводы, например, в декабре 1935 г. сдан в эксплуатацию первый в СССР Днепровский магниевый завод. Существующие комбинаты растут и развиваются, на их базе образовываются такие заводы, как алюминиевый, глинозёмный, электродный (Днепровский алюминиевый комбинат), металлургический, ферросплавный, шамотный, завод инструментальных сталей (комбинат «Запорожсталь»). К 1937 г. в Запорожье производилось 60 % алюминия, выпускаемого в стране, 60 % ферросплавов, 100 % магния, 20 % стального проката.

3. Органогенез (процесс образования комплекса осевых органов) [5].

И в послевоенные годы градообразующей базой стремительного развития Запорожья является промышленность. Индустриальный комплекс города пополнился новыми крупными предприятиями, что осложнило сложившуюся в городе ситуацию с жильем. В 1950–60-е гг. большая часть жителей жила в бараках, которые были построены для тех сотен тысяч строителей, которые после войны поднимали Запорожье из руин. Поэтому появление во 2-й половине 60-х гг. в городе домостроительного комбината и нескольких новых домостроительных трестов позволило на протяжении многих десятилетий решать жилищный вопрос для семей запорожцев. Изменился и архитектурный облик города: исчезли кварталы бараков, а на их месте появились новые микрорайоны многоэтажных домов. В начале 70-х гг. XX в. началась активная застройка новых жилых районов: Хортицкого – на правом берегу Днепра, чуть позже Бородинского, Осипенковского и Южного микрорайонов.

Этапы формирования г. Запорожья напрямую зависели от развития промышленности (рис. 3).

С учетом современного положения вещей в промышленности необходимость кардинального пересмотра градостроительной ситуации назрела уже давно. Запорожье – это один из самых неблагополучных в экологическом отношении город Украины. В городе расположено 197 предприятий с вредными выбросами в атмосферу. Уровень загрязнения воздуха характеризуется как очень высокий, а его качество по уровню угрозы – «умеренно угрожающее» и «угрожающее» [6]. Ежедневно в воздух Запорожья выбрасывается более 150 химических веществ, многие из которых относятся к первому или второму классам опасности.

Согласно официальному сайту мэрии г. Запорожья, одной из основных задач социально-экономического развития города является снижение негативного антропогенного воздействия на окружающую среду. Решить эту задачу можно путем реновации и реконструкции промышленных территорий города, анализ и оценка состояния которых показали, что существуют заброшенные промышленные территории, нуждающиеся в санации.

Запорожье, как и большинство промышленных городов, очень нуждается в рациональном использовании территориальных ресурсов. С учетом того, что около 17 % территории города занимают промышленные предприятия и коммунально-складские объекты [6], а также значительная часть жилой застройки города (до 70 %) находится в зонах влияния промышленных предприятий, первоочередное направление реновации по рейтинговой значимости – центральная часть города. Центр Запорожья находится на левом берегу. Планировка города, расположенного на обоих берегах Днепра, представлена компактной открытой структурой, и в то же время застройка хаотична и агрессивна. Левобережная часть города линейная и очень неоднородна по функциональному зонированию.

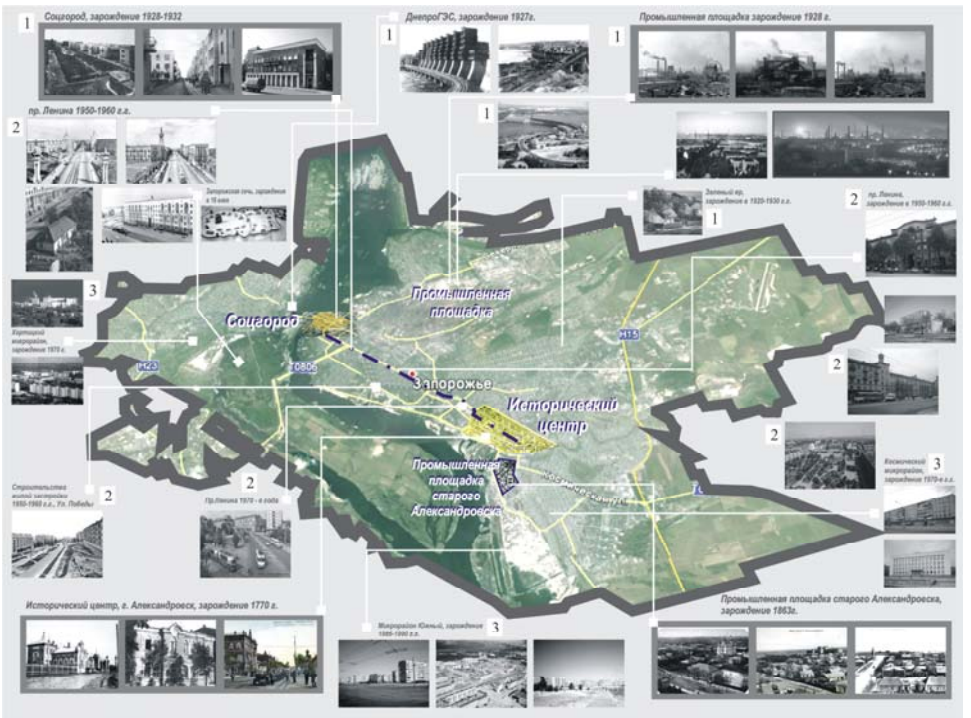


Рис. 3. Схема эмбрионального развития г. Запорожья

Селитебные территории расчленяются транспортными и коммуникационными коридорами, они вытянуты вдоль берега и очень часто примыкают и сосуществуют с промышленными территориями.

Необходимость кардинального пересмотра градостроительной ситуации, особенно в центральной части, очень актуальна. Естественно, наиболее высокая концентрация деятельности административного и интеллектуального характера, культурно-бытового обслуживания сосредоточена на центральных территориях города. Благодаря реновации (реновация – обновление, адаптивное использование зданий, сооружений, комплексов при изменении функционального назначения) промышленных территорий бездействующих заводов

(рис. 4), может быть востановлена целостность городской структуры, улучшены функционально-планировочные и композиционно-пространственные качества города.

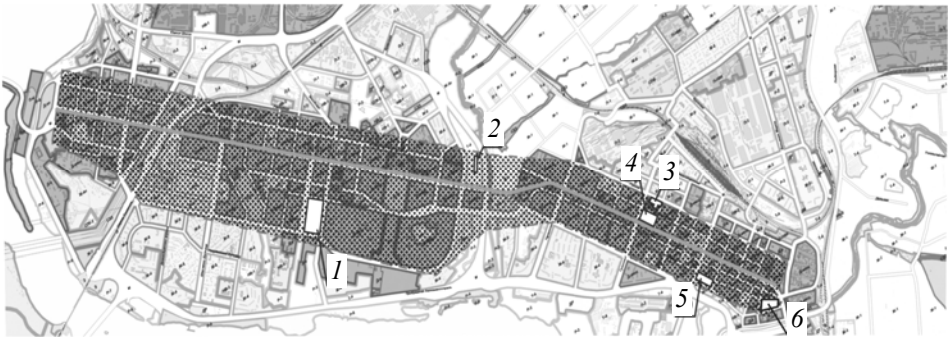


Рис. 4. Промышленные территории бездействующих заводов (белый цвет) в центральной части города:
1 – бывший завод «Гамма»; *2* – кооператив гаражей в центре города; *3* – обанкротившийся пивоваренный завод; *4* – завод Войкова; *5* – бывший водочный завод; *6* – завод «Радиоприбор»

Каждая реновация является уникальной, и ее невозможно повторить, типизация реноваций облегчила бы задачу. Важным моментом является выявление первоочередности реновации промышленных территорий бездействующих заводов (рис. 5).

Рис. 5. Алгоритм очередности реновации промышленных территорий

Для формирования эстетически и экологически благоприятной среды необходима санация города, основанная на принципах реновации промышленных территорий.

Основные принципы реновации промышленных территорий города на примере г. Запорожья:

Принцип комплексности реновации промышленных территорий предполагает определенный блок мероприятий, направленных на определение новой функции, новой планировочной структуры территории с учетом всего организма города в целом.

Принцип рейтинговой значимости, т. е. анализ статистических данных по состоянию и наличию заброшенных промышленных территорий.

Принцип инвентаризации, т. е. выявление элементов планировки и застройки промышленных территорий, а также объектов архитектурно-градостроительного наследия на промышленных территориях и оценка их роли в композиции и облике города.

Принцип приоритета, т. е. определение первоочередности наиболее эффективного функционального решения в экономическом и экологическом аспектах реновации в данном локальном месте именно для данного конкретного города.

Принцип алгоритмности, т. е. проведение реновации последовательно и пошагово соответственно принятой методике.

Принцип формирования безбарьерной экологической среды обеспечивает создание и сохранение благоприятного экологического климата на прилегающих селитебных территориях путем выноса или закрытия вредного производства и ликвидации санитарно-защитных зон.

Принцип адаптации определяет возможность реновации и трансформации промышленной территории. То есть после мероприятий инженерно-технического переустройства и перепланировки внутреннего пространства появляются возможности создания многофункциональных центров для обслуживания жилых массивов.

Принцип гуманизации предполагает развитие городской среды для нужд человека. Повышенные требования к его жизнедеятельности, основанные на здоровом образе жизни: создание новых зеленых пространств, объектов обслуживания, спорта и отдыха.

Принцип социальной направленности, т. е. создание пространств, комфортных для людей с особыми потребностями с учетом их сложных жизненных обстоятельств.

Принцип обновления и адаптивности, т. е использование временных конструкций, легко устанавливаемых и демонтируемых по мере надобности, для самовосстановления некоторых природных компонентов.

Принцип культурной матрицы, т. е. учет культурных традиций, религиозных представлений и особенностей национального быта, на основе которых происходит идентификация и самоидентификация города.

Принцип дигитальной архитектуры, т. е. формирование внешнего облика с использованием компьютерных технологий, а также функционирование сооружений только по принципу «умных домов».

Принцип биопозитивности, т. е. максимальное озеленение не только промышленных территорий, подлежащих реновации, но и в целом всей территории г. Запорожья.

Максимально эффективное достижение целей реновации возможно благодаря общей схеме управления процессом реновации промышленных территорий (рис. 6). С момента анализа промышленных территорий, формирования концепции реновации и до ее завершения, включая реализацию и контроль, проходит жизненный цикл реновации промышленных территорий.

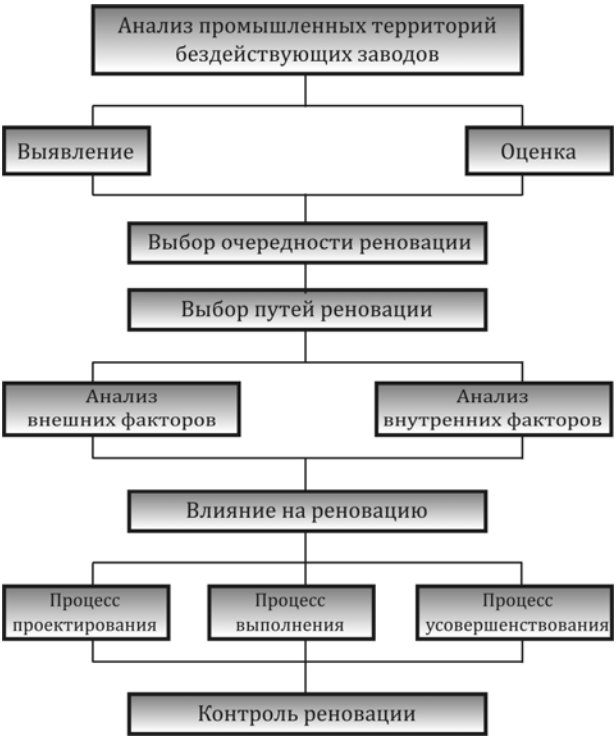


Рис. 6. Общая схема управления процессом реновации

Выводы

1. Уделив должное внимание градостроительному анализу архитектурно-пространственной среды г. Запорожья, удалось выявить основные градостроительные этапы развития города под воздействием формирования промышленных территорий.

2. Санация города возможна благодаря реновации промышленных территорий, которые имеют огромный потенциал.

3. Выявление принципов реновации с учетом современного состояния промышленных территорий позволяет определить направление рационального использования территориальных ресурсов промышленных городов.

4. Промышленные территории городов, как любые градостроительные формы, должны трансформироваться и развиваться, создавая благоприятные условия для гуманизации городской среды.

Библиографический список

1. *Офіційний портал Запорізької міської влади* / Соціально-економічний паспорт м. Запоріжжя за підсумками 2012 року. – Условия доступа : http://www.meria.zp.ua/test/index.php?id=22
2. *Новицький, Я.П.* Історія міста Олександрівська, (Катеринославської губ.) у зв'язку з історією виникнення фортець Дніпровської лінії 1770–1806 р. / Я.П. Новицький. – Условия доступа : history.org.ua/LiberUA/Book/novits1/4.pdf. – Катеринослав : Друкарня Губернського Земства, 1905. – 176 с.
3. *Алешин, В.Э.* Развитие представления о социалистическом поселении в градостроительстве Украины в 1920-х – начале 1930-х гг.: дис. … канд.. архит. – Условия доступа : http://www.alyoshin.ru/Files/diss.html
4. *Гаструляция.* – Условия доступа : http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=2
5. *Органогенез.* – Условия доступа : http://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/3893
6. *Основні положення.* Генеральний план Запоріжжя. ДІПРОМІСТО, 2003.

References

1. *Ofitsiinii portal* Zaporiz'koї mis'koї vladi. Sotsial'no-ekonomichnii pasport m. Zaporizhzhya za pidsumkami 2012 roku [Socioeconomic passport of Zaporozhye]. Available at : http://www.meria.zp.ua/test/index.php?id=22
2. *Novits'kii Ya.P.* Istoriya mista Oleksandrivs'ka, (Katerinoslavs'koї gub.) u zv'yazku z istoriєyu viniknennya fortets' Dniprovs'koї liniї 1770–1806 r. [History of Aleskandrovsk, 1770–1806]. Available at : history.org.ua/LiberUA/Book/novits1/4.pdf
3. *Aleshin V.E.* Razvitie predstavleniya o sotsialisticheskom poselenii v gradostroitel'stve Ukrainy v 1920-kh – nachale 1930-kh gg.: dis. … kand.. arkhit [The concept of socialist settlings in Ukraine in 1920-30s. PhD Thesis]. Available at: http://www.alyoshin.ru/Files/diss.html
4. *Gastrulyatsiya*. Available at : http://dic.academic.ru/searchall.php?SWord=2
5. *Orgonogenez*. Available at : http://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/3893
6. *Osnovni polozhennya*. General'nii plan Zaporizhzhya [Main regulations. General plan of Zaporozhye]. DIPROMISTO Publ., 2003.

УДК 72.012

КОЛОСОВА ИРИНА ИВАНОВНА, канд. архит., доцент,
epyon@sibmail.com
ОСТРОУХОВА ЕВГЕНИЯ АЛЕКСАНДРОВНА, студентка,
flossdandelion@sibmail.com
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЛАГОУСТРОЙСТВА АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ ГОРОДА ТОМСКА В XVII – НАЧАЛЕ XX В.

Исследование посвящено изучению истории становления сети улиц г. Томска, а также уличного пространства как архитектурной среды. Рассмотрены пути развития инженерных коммуникаций, освещения, озеленения и мощения – основных элементов благоустройства улиц. Прослежено формирование планировочной структуры города с момента его основания. Рамки исследования охватывают также и малые архитектурные формы, влияющие на архитектурно-художественное восприятие уличного пространства, такие как заборы, ворота и калитки, рекламное оборудование.

***Ключевые слова**:* улица; уличное освещение; мощение; озеленение; план города; благоустройство улицы.

IRINA I. KOLOSOVA, PhD, A/Professor,
epyon@sibmail.com
EVGENIA A. OSTROUKHOVA, Student,
flossdandelion@sibmail.com
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

THE SYSTEM OF ARCHITECTURAL IMPROVEMENT IN THE TOMSK-CITY IN THE 17TH AND EARLY 20TH CENTURIES

The paper presents a study of the historical formation of the street network in the Tomsk City as well as the street space as the architectural environment. The ways of development of engineering services, lighting, planting, and paving are considered in this paper as essential elements of the street improvement. A formation of the planning structure of the city is described since its foundation. The scope of the study also covers hard landscaping affecting the architectural and artistic perception of street space, such as fences, gates and wickets, advertising equipment.

Keywords: street; street lighting; paving; planting; city plan; street planting.

Первое русское поселение на месте современного Томска было основано в 1593–1594 гг. В 1601 г. оно было укреплено, а в 1604 г. на возвышенности, названной позже Воскресенской горой, началось строительство Томской крепости. Именно крепость с конца XVI и до начала XVIII в. являлась основным градостроительным ядром города на р. Томи [1].

Планировочное решение крепости было выполнено с учетом ее основной функции – оборонительной. Внутри городских стен, по углам которых были установлены сторожевые башни, располагались: съезжая изба – канцелярия и хоромы воеводы, деревянная церковь, житницы, амбары и погреба [1] (рис. 1). Вокруг крепости достаточно быстро сформировался торгово-ремесленный посад. В 1609 г. он, так же как и крепость, был огорожен стеной. Рядом с поселением располагался острог, защищавший жителей от набегов кочевых племен. В 1630 г. под горой был построен новый посад, по периметру которого была установлена крепостная стена [2].

а *б*

Рис. 1. Макеты Томских крепостей:
а – первая Томская крепость; *б* – вторая Томская крепость

В 1629 г. Томск стал центром разряда (области) и расширил свои границы. Теперь он включал торгово-ремесленный посад по всему периметру крепости и два острога: верхний и нижний [1]. Одновременно в структуре томского посада сформировались два торга. Один – непосредственно под крепостью на правом берегу р. Ушайки, второй на ее левом берегу – меновой «калмыцкий» торг. Рост торговли и, как результат, увеличение территории двух торгов обусловили их последующее объединение и образование крупной площади – Базарной (пл. Ленина) [3].

После пожара в середине XVII в. в Томске был построен новый укрепленный центр (кремль), расположенный на южном мысе Воскресенской горы. Кремль был окружен стеной с семью крепостными башнями; в северной стене располагались ворота, ведущие из крепости. В планировке сохранилось деление на город и острог [1]. Крепость по-прежнему играла роль центрального планировочного ядра, при этом строительство велось на основе общих для всех русских городов приемов градостроительного искусства [4]. Все здания располагались по периметру крепости, образуя в центре небольшую площадь. На некотором расстоянии от построек вплоть до ограды Воскресенской церкви строились дома горожан. Они образовали прямую улицу в два ряда домов, ставшую первой улицей города, которая тянулась от проездной башни в северной части крепости до церкви первого Успенского монастыря.

Укрепление восточных границ Российского государства привело к утрате Томском значения города с выраженной оборонительной функцией и пред-

определило его дальнейшее развитие как торгового-административного центра Сибири. И, как результат, крепость потеряла значение центра города [5].

С основания Томска и до конца XVIII в. коренное население – татары – жили в районе Юрточной горы. Единственными капитальными строениями здесь были Никольская церковь (ныне не сохранилась) и мужской Богородице-Алексеевский монастырь. Первые дома, построенные на Юрточной горе, сформировали ул. Почтамтскую (пр. Ленина) [6].

Самые значительные изменения в планировке относятся к 1767 г. В первую очередь это относится к приемам строительства в Воскресенской части города. Дом воеводы со службами находится теперь вне территории крепости на ул. Воскресенской. Четко «прочерчены» кварталы Подгорной части в районе современных улиц Октябрьской и Шишкова. При этом характерной особенностью застройки городских улиц является то, что жилые дома не образовывали единого фронта вдоль проезжей части улиц, а располагались с большим или меньшим отступом от красной линии в глубь двора [5].

Продолжается развитие главной Базарной площади – здесь строится гостиный двор. Это обусловлено ростом торговли в городе и отразилось на его внешнем облике [7].

Следует подчеркнуть, что большая часть домов и немногочисленные храмы Томска выполнены из дерева [Там же]. Окруженные оградами усадьбы «лучших людей» с хоромами, баней, сараями, складами и домовой церковью чередовались и соседствовали с плотной застройкой небольшими, близко поставленными жилыми домами «молодших людей». Они выходили на улицу узкой торцовой частью. Вход в них, как правило, устраивался сбоку. На фасадах рядовых жилых домов имелись только узкие, напоминающие щели, волоковые окна шириной в одно бревно [2].

Дальнейшие перепланировки города XVII–XVIII вв. также осуществлялись в соответствии с общими для России градостроительными приемами. Следует отметить, что ряд территорий, оказавшихся вне внимания городских властей, в качестве основных использовали планировочные решения, где учитывались природные условия и ландшафт местности. В этом случае дома располагались не фронтом по улице, а с отступом в глубь двора. Такой прием был характерен для городов европейской части России, при этом менее застроенными оставались северные части улиц [7].

Время правления Петра I (конец XVII – начало XVIII в.) принято считать рубежом двух эпох [2]. Это был период, когда правительство целенаправленно предпринимало специальные меры, ориентированные на введение и закрепление новых архитектурно-градостроительных принципов. Были изданы указы, которые определили расположение вновь строящихся домов только вдоль линии улиц и запретили их строительство в глубине двора. Для деревянных зданий были установлены обязательные противопожарные разрывы. Особенно подчеркивается, что в соответствии с правилами регулярного градостроительства дома, возведенные по красной линии улиц, должны иметь геометрически правильные формы плана и объема, выходить на улицу главным фасадом. Таким образом, фасад, выходящий на улицу, получает значение

парадного. При этом и главный фасад, и уличное пространство становятся объектом специального внимания архитекторов и градостроителей [2].

Несмотря на новые планировочные приемы и требования, градостроительная структура Томска к этому периоду по-прежнему на большинстве территорий имеет свободную планировку. Более того, значительные пространства на периферии города застраивались стихийно, подчиняясь природным условиям и рельефу местности. В результате город получил неправильную сетку коротких и криволинейных улиц [4]. При этом сохранен принцип зонирования городских районов на торговые, административные и культовые площади – каждый со своими центрами, что характерно для градостроительства XVIII в. Но следует подчеркнуть, что они начинают приобретать новые композиционно-пространственные качества. В Томске центр развивался по меридиональной оси, вдоль р. Томи, где помимо существующей торговой площади была организована новая, на Юрточной горе. Начинается строительство зданий по ул. Обруб. Это в основном деревянные лавки и амбары для торговли и хранения товаров, принадлежавшие городу [5].

Начало XVIII в. характеризуется вновь возросшим вниманием российского государства к планировке и застройке городов. Политика формирования городской застройки на основе принципов регулярного градостроительства выдвигала в числе значимых перечень строгих требований к благоустройству. Главными стали оздоровление городской среды и приведение в порядок городского хозяйства. В крупных городах европейской части России еще с Петровских времен проводились систематические мероприятия по благоустройству: санация городской территории, мощение и облицовка камнем улиц и набережных, установка фонарей для вечернего освещения улиц, разбивка парков, бульваров и озеленение, устройство городских водопроводов и канализационных стоков [13]. В начале – середине XVIII в. подобные нововведения начали появляться в архитектурном облике Томска [7].

Организация в 1735 г. Московско-Сибирского тракта, проходившего через Томск, превратила город в крупный торговый центр Сибири. Одновременно с торговлей начинается активное развитие местных ремесел, промыслов и речного судоходства. Томск становится главным пунктом товараспределения. Это повлияло на его архитектурно-пространственную организацию. Теперь главным ядром планировочной структуры города становится исторически сложившаяся Базарная площадь [4].

На смену свободной планировке, стихийно сформировавшейся под влиянием природных условий, пришла регулярная застройка. Вновь проектируемые и застраиваемые улицы идут параллельно или перпендикулярно берегам рек. Наличие активного пересеченного рельефа и болота позволили разбить город на ряд самостоятельных жилых районов [4].

На плане 1748 г. четко выделяются районы, где строительство велось в соответствии с определенными и выделенными городскими властями территориями, запроектированными с учетом естественных границ городских валов. Такими районами стали Татарская слобода, Пески и Заозерье, расположенные по бровке долины р. Томи и под Воскресенской горой [6]. Жилая за-

стройка на Воскресенской горе в районах Болото и Кирпичи состоит, в основном, из одно- и двухэтажных деревянных строений.

Как отмечалось выше, первая улица города была ориентирована на Воскресенскую церковь Успенского монастыря, а свое начало брала от проездной башни в северном прясле первой крепости. Запроектированная позже вдоль рельефной террасы ул. Воскресенская также в качестве ориентира использовала церковь Воскресения Господня [5] (рис. 2).

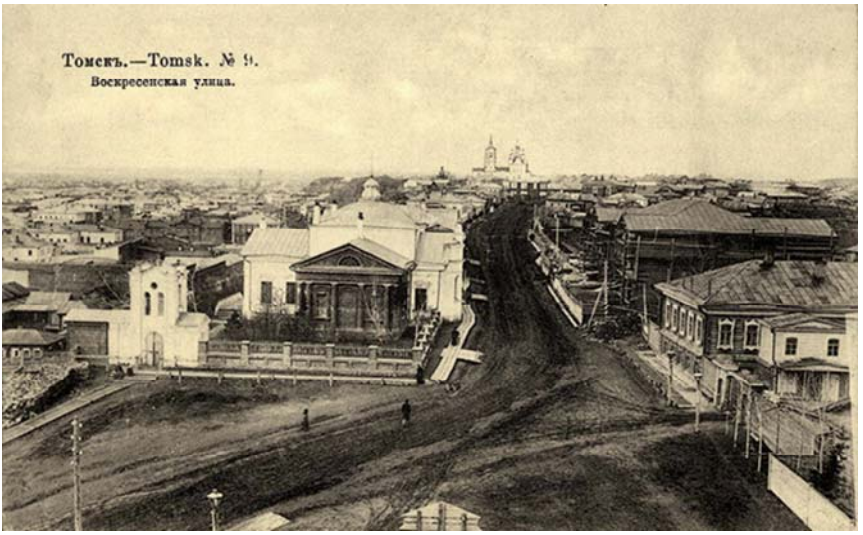


Рис. 2. Первая улица г. Томска

Постепенно город отходит от планировки, присущей старым русским городам. Теперь центральная часть Томска застраивается по новой, прямолинейной системе с выделенным административным ядром, где располагался кремль. Тем не менее, планировка окраинных районов частично включает территории со свободной застройкой, учитывающей природные условия ландшафта [2]. По-прежнему большое количество городских зданий выполняется из дерева, в частности избы на высоких подклетях с двухскатной щипцовой крышей, которые были основным типом застройки русских городов этого периода [4].

Немецкий ученый П.С. Паллас, посетивший Томск в 1770 г. после пожара, уничтожившего значительную часть города, писал: «Главная часть города лежит внизу горы вдоль по Томе, коей большая половина с тремя церквами в бывшем прошлого года пожаре выгорела. Нельзя себе ничего беспорядочнее представить, как узенькие кривые и одна другую пересекающие улицы, домы, один другой загораживающие, и скверные лачужки, которые, как еще по остаткам видно, все сие многолюдное место составляли. И как счастие города, что после пожара принудили жителей некоторым образом, против их упорства, выстроить пожарища регулярными улицами и по новому плану. Но как все сие строение еще не совершенно, то весь город от пожарищ и погребных остатков и проч. имеет весьма жалостный вид. В нижней части города грязь чрезмерная, так что кареты в оной вязнут по самые ступицы...» [9].

Другой ученый, академик Фальк, посетивший город в 1771–1772 гг., писал: в городе «2274 дома – все деревянные, по неправильным и обывательским немощеным улицам». На гравюрах XVIII в. можно увидеть, что это были рубленые строения, лишенные украшений. Некоторая суровость, основательность и тяжеловесность облика построек – главные отличительные черты томских зданий. Монументальность бревенчатым постройкам придавала постановка домов на высокий подклет – обязательную конструктивно-хозяйственную часть томского жилища [2].

В 1773 г. Комиссией о каменном строительстве Санкт-Петербурга и Москвы был разработан первый регулярный план г. Томска, где предусматривалось функциональное зонирование города на основе выделения территорий под застройку в соответствии с сословной принадлежностью. Самые высокие и сухие территории рядом с Воскресенской горой предназначались для состоятельных жителей. Окраины города – районы Заозерья и Заисточья – отводились для деревянной застройки бедного населения. Регулярная, геометрически правильная сетка улиц нового плана не вполне отвечала местным природным условиям. Но, несмотря на это, теперь и окраинные районы города были застроены в соответствии с утвержденным планом 1773 г. [7]. Строительство города на основе регулярного плана, проектирование, организация и расположение улиц и площадей в соответствии с их значением для городской жизни и функциональным назначением положительно повлияли на благоустройство Томска.

В конце XVIII в. Томская крепость потеряла статус оборонительного сооружения и была демонтирована. Томск стал крупным торгово-ремесленным центром. Одним из отличительных признаков архитектурного облика становится строительство каменных храмов – самых крупных и капитальных зданий города [4].

В русском градостроительстве конца XVIII – первой половины XIX в. наибольшее распространение получили принципы типового строительства на всей территории страны. Это было связано с реализацией требования по созданию регулярной ансамблевой застройки городов. Типовое проектирование обеспечивало быстрое и качественное строительство в условиях нехватки квалифицированных архитекторов и строителей. Создание большого количества «образцовых проектов» и целых «собраний фасадов» привело, в свою очередь, к распространению русского классицизма по всей России [4].

В сибирских городах, в отличие от европейской части страны, плановые мероприятия, связанные с решением вопросов внешнего благоустройства, начали складываться в конце XVIII – начале XIX в. Они включали в себя мероприятия, обеспечивающие качественное состояние дорог, строительство и укрепление набережных, взвозов, мостов и переправ [8].

В Томске к началу XIX в. в районе Пески, в устье р. Ушайки, был сформирован новый городской центр: построены первые каменные здания – биржевой корпус, Гостиный двор, магистрат, полицейская часть с пожарной каланчой и др. [7].

В 1804 г. Томск становится столицей губернии, что привело к широкомасштабной застройке города. Наиболее активно ведется освоение терри-

тории Юрточной горы. Особенно активно этот район стал застраиваться в период, когда рядом с городом было найдено золото. Развитие золотопромышленности обусловило приток в Томск крупных капиталов. Начинается массовая застройка каменными и деревянными жилыми особняками, общественными зданиями, выполненными в стиле классицизм, культовыми сооружениями. Новые объекты стали играть роль архитектурных доминант, обогатили визуально-пространственную и градостроительную композицию города [6].

Изменение архитектурно-художественного облика города привело к необходимости решения главной проблемы городского благоустройства. Ею был «пасущийся по улицам и площадям скот и огромное количество навоза, которым заваливали лужи и ямы, сваливали в реки и овраги, но он все равно оставался главным препятствием чистоты и соблюдения санитарных норм» [4]. Частично вопрос был решен за счет организации уличного покрытия.

К 1910 г. было выполнено мощение булыжником ул. Ефремовской (сегодня ул. Бакунина) (рис. 3, *а*, *б*). Одновременно замостили Октябрьский взвоз (рис. 4). При этом мощение осуществили только после того, как с него сняли верхний слой земли. До этого пешеходный подъем по взвозу обеспечивала деревянная крутая лестница с поручнями. Кроме того, были выполнены ограждения вдоль подножия Воскресенского мыса по Обрубу и со стороны района Болото.

Как правило, благоустройство низменных мест, в частности ул. Обруб, Загорной, Акимовской (ныне ул. Шишкова), ограничивалось устройством мостовых и деревянных тротуаров. Тротуары соединялись с мостовой пандусами, под которыми были проложены водосточные канавы. Стелились тротуары или по красной линии вплотную к домам, или на небольшом расстоянии от фасадов зданий. В отдельных местах между тротуарами и мостовой устанавливались небольшие разграничительные столбики.

а *б*

Рис. 3. Мощение ул. Бакунина:
а – общий вид улицы; *б* – начало улицы

Рис. 4. Сохраненная часть мощения по Октябрьскому взвозу

Одновременно с отдельными видами выполняемых работ был разработан план мероприятий по благоустройству Томска. В первую очередь городские власти рассчитывали «привести в исправность» Воскресенский и Юрточный взвозы, спуски по Московскому тракту, площади возле гауптвахты, «против Рыбного ряда и Калашного», Благовещенскую, Гостинодворскую. Кроме того, планировалось построить новые мосты через р. Ушайку и р. Исток[1].

Первым крупным комплексным мероприятием по благоустройству Томска можно считать работу инженеров путей сообщения. Они вели изыскания и осуществляли техническое руководство инженерно-строительными работами[2]. Работы включали в себя широкий список мер: укрепление берегов р. Ушайки и строительство моста через нее, профилирование улиц с необходимыми насыпями и канавами, устройство водных бассейнов (в нуждах пожарной безопасности), укрепление взвозов, мощение части улиц [10].

Для развития Московского тракта была срыта часть Юрточной горы, построены новые мостовые из бревен, по обеим сторонам которых располагались канавы для стока воды. По проекту инженера Г.С. Батенькова было организовано водоснабжение города. Он нашел подземные питьевые ключи и предложил построить водосборные бассейны. Позже Батеньков писал: «Здесь, в Томске, я прокладывал и провешивал улицы, погрязая по пояс в болоте. Теперь там каретная езда» [11].

Об изменениях в облике города можно прочитать в «Письмах путешественника по Сибири», опубликованных в 1827 г. в «Северной пчеле» (№ 15) анонимным автором. Он пишет (письмо от 19 августа 1826 г.), что в Томске

[1] Материалы из Государственного архива Томской области. Ф. 127. Оп. 1. Д. 885. Л. 332–333.
[2] Там же. Л. 256.

«улицы расположены правильно, исключая еще немногие, кои представляют большую противоположность с регулярностью лучших частей целого... Многие из домов обшиты тесом и приятно окрашены; другие еще обшиваются; строят новый мост через один проток Ушайки и работают набережную сей реки; но каменные здания по большей части носят на себе отпечаток какой-то пестроты и дурного вкуса в Архитектуре. Причиною сему недостаток художников, которые неохотно выезжают из столицы в отдаленные губернии».

И, тем не менее, именно с этого времени градостроительные проекты в Томске стали выполняться специалистами, и было положено начало профессиональному «ученому» строительству. С образованием губернии в штат вводится должность губернского архитектора. Если ранее в основу развития объемно-планировочных композиций был положен принцип совершенствования приемов традиционного народного зодчества, то с этого периода в строительную практику начинают широко внедрять приемы русского классицизма с его строгими формами, обшивкой фасадов тесом (иногда под крупный каменный руст), декорированием оконных проемов. В практику вводится окраска фасадов [2].

Для построек, выполненных в классическом стиле, характерно расположение зданий узким фасадом (в три-пять окон) на улицу. Это обусловлено требованием «о 12-саженном разрыве между деревянными жилыми домами». Вход в здание в большинстве случаев располагался на боковом или дворовом фасадах [2].

В 1830 г. был утвержден генеральный план города, выполненный петербургским архитектором В.И. Гесте, основой которого стала веерная схема. Одновременно с планом были разработаны «Правила застройки», где устанавливались габариты жилых домов и служебных зданий, оград, определялось положение зданий по красной линии, регламентировалась этажность в зависимости от значения и характера улиц и т. д.

Дальнейшее развитие «правильной застройки» связано с организацией в Томске Губернской строительной комиссии. Ее задачей стало регулирование и контроль проектно-строительного процесса в городе и губернии [12]. Город отказался от исторически сложившейся в XVII в. планировки с наличием двух центров. Городской центр перенесли на нижнюю площадку, кремль потерял градообразующее значение и перестал играть роль самостоятельной части городской структуры. Новый центр Томска приобрел развитый архитектурно-пространственный характер. Его сформировали две площади – Старобазарная (Старособорная, сегодня пл. Ленина) и Новособорная, связанные между собой Почтамтской улицей (пр. Ленина).

Перепланировка города в соответствии с нормами регулярного градостроительства привела к изменениям в облике города. Новый «фасад» представлял сочетание каменной и деревянной застройки, выполненной в стиле классицизм. Стиль широко применялся для строительства престижных зданий в течение первой половины XIX в. Монументальность и торжественность архитектуры этих сооружений привели к строительству объектов, где обязательной становится симметричная центрально-осевая композиция с колонным портиком в центре. Торжественная простота, законченность и уравновешенность фасадных плоскостей стали главными характеристиками при формиро-

вании панорамы улиц. Теперь ансамблю улицы присущи однородность и единство. Они явились следствием уменьшения самостоятельной роли отдельных зданий и своеобразной нейтральности их композиции [2].

Кроме того, в архитектурно-художественный облик города органично вписались малые архитектурные формы, тротуары, мостовые. Они стали неотъемлемой частью городского благоустройства.

При формировании «фасада» улицы значительную роль играли заборы. У каждой усадьбы строились свои ограждения и обязательно ворота и калитка. «...Особенно были распространены ворота, совершенно повторяющие каменные формы: рустованные столбы, арочная кладка над проемами калиток. Ворот такого вида сохранилось еще много. На более поздних образцах появляется ажурный фриз, столбы украшены накладными колонками того же характера, что колонны крылец» [13, с. 32]. Наиболее распространенными были заборы типа заплота и заборы из штакетника, который в отдельных случаях имел сетчатый рисунок. Появились палисады. Как правило, их выполняли из дерева, железа или чугуна в виде решеток с каменным цоколем или без него. Открытые дворы встречались редко [5] (рис. 5, *а*, *б*, *в*, *г*).

а *б*

в *г*

Рис. 5. Ворота и калитки:
а – ул. Октябрьская, 1722 г.; *б* – ул. Водяная, нач. XX в.; *в* – ул. Татарская, кон. XIX в.; *г* – Соляной пер., нач. XX в.

До конца XIX в. российские города не имели комплексного освещения, исключение составляли фонари, установленные у некоторых частных домов [14]. Развитие системы освещения улиц шло медленно, что обусловливалось как высокой стоимостью, так и небольшой эффективностью приборов освещения. Масляные фонари давали слабый свет, а газовые были дорогостоящими. Кроме того, они имели короткий срок службы. Использовались в основном керосиновые и керосинокалильные. При этом самыми удобными и эффективными считались электрические фонари. Их стали устанавливать на улицах сибирских городов в конце XIX в. [15, с. 126, 127].

Первое уличное освещение в г. Томске было выполнено в 1832 г. после соответствующего постановления Томской городской думы. Для освещения города были смонтированы 89 керосиновых фонарей. Их установили вдоль трактовой дороги от Московского до Иркутского шлагбаумов[3]. Они располагались вдоль улиц при въезде в город с западной стороны и на выезде по Иркутскому тракту. Включали фонари в весенне-осеннюю распутицу и только в безлунные ночи [Там же, с. 125–127]. Известно, что в конце 1850-х гг. самой освещенной была «дорога от домов Сосулиных», которая «до самой Степановки была освещена керосиновыми фонарями. Большая по тому времени редкость» [16].

С середины XIX в. городское строительство стали вести строго в соответствии с регулярным планом, разработанным В.И. Гесте. При этом для вновь возводимых зданий стали использовать альбомы с образцовыми проектами. Именно образцовые проекты позволили сформировать новое «лицо» города. Они обеспечили не только высокое качество застройки, но и ее уникальное стилевое единство [6]. Градостроительным модулем по-прежнему остается усадьба, которая и определяет приемы объемно-пространственной организации городской среды.

Работы по благоустройству этого периода ориентированы в первую очередь на осушение городских мест, находящихся на болотистых и затопляемых территориях [8]. При этом устройство дренажных канав было особенно актуально для районов города, ежегодно затапливаемых во время весеннего половодья. Одним из таких районов была территория, расположенная в пойме р. Ушайки под Воскресенской горой. В 1850 г. инженером-поручиком Томской строительной комиссии М.И. Бедрягой был выполнен проект со сметой «на устройство подземных водосточных труб для осушения болотистых частей подгорной местности города Томска»[4]. Позже, в 1860 г., инженер В.К. Фадеев составил акт осмотра Базарной площади, где предложил выполнить работы по ее дренажу и вертикальной планировке: «произвести планировку оной с самым незначительным скатом к реке Ушайке, осушение канавами или трубами»[5].

В конце XIX в. в Томске было построено самое большое количество каменных зданий, а главным для города стилевым направлением в архитектуре

[3] Материалы из Государственного архива Томской области. Ф. 127. Оп. 1. Д. 1518. Л. 2.
[4] Там же. Ф. 6. Оп. I. Д. 775. Л. 8–9.
[5] Там же. Д. 1440. Л. 16.

престижных зданий стала эклектика. Одновременно для массового и дешевого строительства использовали «кирпичный» стиль [7].

Отмена крепостного права привела к появлению нового социального класса – буржуазии. Это оказало огромное влияние на развитие архитектуры. Наиболее явно новые тенденции отразились в декоративном убранстве сооружений, в частности в использовании местных традиций при орнаментации фасадных плоскостей. Именно в этот период формируются приемы томской домовой декоративной резьбы. Кроме того, увеличение объемов строительства привело к уменьшению разрывов между зданиями и большему разнообразию в протяженности фасадов по улице. В результате увеличились размеры и количество оконных проемов, выходящих на главный фасад. Основным типом застройки в это время становится не особняк, а двухквартирный дом [2].

В 1865 и 1877 гг. были разработаны планы Томска, в основе которых лежало предложение о замене веерной планировочной системы на регулярную, прямоугольную. Предложенное решение не учитывало местные условия, тем не менее традиционно было принято местной властью к исполнению. Рост объема строительства на центральных территориях поступательно закреплял границы основных планировочных районов, что, в свою очередь, привело к сложностям при перепланировке этих частей города [5]. Площадкой, где строительство велось по утвержденному генеральному плану, стал один из десяти исторически сложившихся районов города – Верхняя Елань [6].

В 1880–1890-е гг. самым распространенным стал новый тип зданий – доходный дом на 4–6 квартир (каждая по 5–7 комнат). Он представлял собой двухэтажный деревянный дом на высоком каменном цоколе. В плане это был вытянутый прямоугольник, ориентированный более длинной стороной на красную линию. Новые дома потеряли характер усадебной застройки, поэтому вход в них стали располагать в центре главного уличного фасада, иногда его смещали вправо или влево от центральной оси. Такие деревянные двухэтажные дома строили на улицах Томска в ряд, без отступа от тротуаров. Дома выходили на улицу узким «парадным» фасадом, а более длинный фасад уходил в глубину двора. Массовое возведение таких зданий связано со строительством в Томске первого в Сибири университета [2].

С середины XIX в. при формировании «фасада» улиц в его структуру стали включать деревья, посаженные вдоль тротуаров [17]. Тем не менее, планомерное озеленение Томска началось только в конце XIX в. Среди наиболее интересных решений в области озеленения были: организованный в 1891 г. Городской сад на Ново-Соборной площади, Пушкинский сквер, площадка Общества содействия физическому развитию на Соляной площади, Всеволодо-Евграфовский бульвар, Лагерный сад. Последний планировали как будущий «народный парк с проектируемым в нем музеем на открытом воздухе». Одновременно Городской Думой принято постановление об обязательном озеленении городских улиц. Впервые было предложено резервировать «для садов и скверов необходимых участков земли... путем приобретения и отчуждения» [18, с. 255].

К концу XIX в. все главные улицы города получили искусственное освещение. Для освещения больших пространств использовали электрические

фонари на высоких столбах с кронштейнами. Лампочки таких фонарей помещали в сферу, которая свободно свисала вниз с кронштейнов (рис. 6) [19]. При этом установленные ранее старые фонарные столбы оставили на своих местах. Такие фонари (масляные, керосиновые, газовые) имели четырех- и пятиугольные плафоны, а более поздние – круглые на трех подставках [5].

В 1891 г. Томск получил разрешение на строительство первой в Сибири городской центральной электростанции [15, с. 125–127]. В 1895 г. в городе заработали первые десять фонарей на улицах Магистратской (ул. Розы Люксембург), Миллионной (пр. Ленина) и на Воскресенской горе [20].

Другой важной проблемой городского благоустройства было состояние проезжей и пешеходной частей улиц. На главных улицах Томска устраивали деревянные мостовые для пешеходов (настилы и тротуары), проезжую часть посыпали гравием и «шоссировали», между пешеходной и проезжей частями вырывали канавы для отвода воды. Власти обязали домовладельцев содержать участки улиц в эксплуатационном состоянии: «Против дома своего... содержать улицу до половины ширины ее в исправности и чистоте, заравнивая образующиеся на ней выбоины» [21, с. 261] (рис. 7).

Рис. 6. Электрический фонарь, XIX в.

Рис. 7. Проезжая часть, ул. Дворянская

Новый этап в формировании облика города связан с постройкой в 1891–1900-х гг. Сибирской железной дороги. Город стал крупным научно-образовательным и торговым центром Сибири. В архитектуре главенствующим направлением стал модерн. Отличительной чертой зданий, выполненных в этом стиле, стали всефасадность, взаимосвязь внешнего и внутреннего, обтекаемость форм, использование мягких линий и причудливого растительного орнамента. Главную улицу города начали активно застраивать зданиями банков, крупных магазинов, гостиниц и доходных домов. В ее облике появились элементы столичности, респектабельности.

Неоклассицизм на фасадах престижных зданий появился почти сразу после модерна. Одновременное строительство разностилевых зданий привело к тому, что застройка города приобрела большую масштабность и монументальность. Модерн и неоклассицизм занимали лидирующее положение в архитектуре Томска более десяти лет и сформировали его центральную улицу как улицу столичного города [7].

Во второй половине XIX – начале XX в. в строительстве использовали как дерево, так и камень. При этом знаковые для города объекты строили в камне, в то время как большинство жилых домов и городские усадьбы продолжали возводить из дерева [4].

В районах, примыкавших к торговому центру, застройка представляла собой здания, вплотную поставленные друг к другу. Их разделяли несгораемые кирпичные стены – брандмауэры. На первых этажах домов размещали магазины [2]. Как и ранее, основное внимание властей сосредоточено на дальнейшем развитии главной улицы Томска. К этому времени она сложилась как композиционно-пространственный стержень центра города. Архитектурный облик ул. Почтамтской сформировали крупные капитальные здания казначейства, торговых домов Гадалова, Шмидта и Штоля, банков и других объектов. Центральные площади потеряли прежний универсальный характер. Теперь они соответствуют своему узкому функциональному назначению: Новособорная, Базарная [5].

В конце XIX – начале XX в. при формировании городского «уличного фасада» неотъемлемым элементом стала реклама. В практике Томска ее редко удачно «вписывали» в архитектуру зданий. Для того чтобы обеспечить центр города рекламой и при этом «разгрузить» архитектуру зданий, на многих улицах в центральной части города установили афишные и рекламные тумбы. Их выполняли круглыми в плане и приподнимали над землей, опорой служила «пятиногая» конструкция. Объяснялось это тем, что не все томские улицы имели мощение и «...грязь, летящая со спиц многочисленных экипажей, легко достигала нижней части тумбы» [5].

В это время большое влияние на городскую жизнь стали оказывать общественные организации (управления). В результате их деятельности в Томске в начале XX в. были выполнены серьезные мероприятия по благоустройству. Городское хозяйство включало в себя общественные водопроводы, электрическое освещение, уложенные брусчаткой центральные улицы, благоустроенные сады, парки и бульвары [8].

Более современный вариант благоустройства с мощением остальных улиц и организацией вертикальной планировки был начат только в 1902 г. До этого времени улицы и площади, за исключением Базарной, «и не мостились настоящим образом, а многократно засыпались галькой ...на что было зарыто в землю много десятков тысяч городских денег, в результате не оказалось ни мостовых, ни средств на их устройство» [18, с. 236].

В 1902 г. значительная часть денежных средств была вложена в мощение и «шоссировку» улиц. В этом году была вымощена булыжником основная часть Базарной площади, а в 1903 г. началось комплексное мощение центральных улиц. При строительстве мостовых на улицах булыжники укладывали на основание из песка по типу «мозаичной», или «рижской», мостовой. Такая мостовая состояла из отколотых, грубо обработанных камней прямоугольной формы.

В 1913 г. в городе действовали 86 улиц и 65 переулков общей протяженностью более чем 100 верст. Из них только четыре улицы обладали достаточными размерами: 20–27 саж. (42,6–57,5 м), остальные имели ширину 10–12 саж. (21,3–25,6 м), переулки были узкими, их габариты не превышали размера 6 саж. (12,8 м). В 1913 г. было выполнено мощение центральных городских улиц длиной 22,3 версты, что составило более 20 % от всей их протяженности.

Теперь одной из самых важных проблем Томска было строительство городского водопровода, т. к. отсутствие источников чистой питьевой воды постоянно грозило городу эпидемиями чумы и холеры [8]. Водопровод сдали в эксплуатацию 15 марта 1905 г. Первая водопроводная сеть была протянута знаменитой фирмой «Братья Бромлей». В 1917 г. в сеть входили водозаборные сооружения, система очистки воды, насосная станция и 34 версты трубопроводов. Все это хозяйство обеспечивало водой 600 домовых хозяйств и 15 водоразборных будок.

Через 20 лет была проведена первая реконструкция водопровода. Следует подчеркнуть, что вплоть до 1950 г. технология подачи воды и система городского водоснабжения не менялись, при этом протяженность сети трубопроводов увеличилась в два раза.

Не уделяли должного внимания и системе городской канализации, что привело к сбросу стоков в природные водоемы и превратило томские озера и реки в сточные канавы [22].

Самым благополучным было состояние существующей системы озеленения города. Ботанический сад первого в Сибири университета, основанный П.Н. Крыловым, играл роль питомника, где выращивали саженцы растений. Их использовали для формирования «зеленого» каркаса города, высаживали на городских улицах и предлагали владельцам участков. Кроме того, одну из главных ролей играли частные сады «Буфф» (владелец В.Л. Морозов) и «Эрмитаж» (владелец А.С. Ефимов) и сады в усадьбах домовладельцев [8]. В начале XX в. Томск по количеству зеленых насаждений на одного жителя (0,2 кв. саж.) занимал первое место среди российских городов, в том числе Москвы (0,1 кв. саж.). В 1911 г. перечень «зеленых» территорий включал 616 усадеб с садами, при этом в отдельных усадьбах сады занимали большие про-

странства, сопоставимые, в соответствии с существующей сегодня классификацией объектов озеленения, с крупными рощами [23]. На балансе городской управы в 1912 г. находилось около 20 тыс. кв. саж. общественных садов.

Параллельно с озеленением продолжали осуществлять программу, связанную с освещением улиц. В 1910 г. на улицах Томска действовало 297 фонарей, из них 272 керосиновых и 25 электрических [15], а к 1927 г. в Томске было установлено 150 электрических фонарей.

После революции 1917 г. на некоторое время был сокращен объем мероприятий, направленных на благоустройство города. Пространство улиц используют только как утилитарное.

Таким образом, анализ изученного материала показал, что с конца XVIII в. в Томске целенаправленно формировалась система мероприятий по благоустройству города, власти осознали ее значение как знакового средового пространства, которое играет главную роль в организации полноценной жизнедеятельности города. На разных этапах развития город поступательно и системно «приводил в порядок» планировочную структуру и застройку в соответствии с новым регулярным генеральным планом. Органы местного самоуправления не оставляли вопросы благоустройства без внимания. Список постоянно пополняли, мероприятия приобрели характер плановых комплексно-системных мер. В начале XX в. градостроительство и благоустройство осуществляли планомерно и регулярно, в соответствии с существующими нормами и утвержденным планом. Состояние Томска, по сравнению с другими сибирскими городами, по ряду позиций было благоприятным (электроснабжение, водопровод, озеленение, мощение улиц и площадей), но все же по многим параметрам уступало крупным городам европейской части России. В значительной степени это связано с государственной политикой, административным статусом города, его бюджетом, численностью населения и объемами застройки. Это результат социально-экономического развития региона и России в целом [8]. Улица в течение длительного времени воспринималась профессионалами только как утилитарное пространство, а не как объект архитектурной среды, играющей важную роль в жизнедеятельности городского населения. Только в последние годы значение улицы как самостоятельной высокохудожественной градостроительной единицы вновь стало интересно специалистам.

Библиографический список

1. *Земля Томская*. Краеведческий портал. – Условия доступа : http://kraeved.lib.tomsk.ru/page/70/ (дата обращения : 19.02.14).
2. *Деревянная архитектура* Томска. – М. : Советский художник, 1987. – 151 с.
3. *Попов, А.М.* Томск / А.М. Попов. – М. : Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1959. – С. 133.
4. *Архитектура* городов Томской губернии и сибирское купечество (XVII – начало XX века) / В.П. Бойко, Е.В. Ситникова, Н.В. Шагов, О.В. Богданова, В.Г. Залесов, Т.Н. Манонина. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2011. – 636 с.
5. *Романова, Л.С.* Здесь начинался Томск. Прошлое, настоящее, будущее / Л.С. Романова. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2004. – 235 с.

6. *Зайцева, З.А.* Деревянная архитектура Томска / З.А. Зайцева. – Томск : Изд-во «Д-принт», 2004. – 370 с.
7. *Богданова, О.В.* Архитектурный облик Томска / О.В. Богданова. – Томск : Изд-во «Красное знамя», 2005. – 144 с.
8. *Манонина, Т.Н.* Благоустройство г. Томска в конце XVIII – начале XX в / Т.Н. Манонина // Вестник ТГУ. – 2010. – № 337. – 211 с.
9. *Паллас, П.С.* Путешествие по разным местам Российского государства / П.С. Паллас. – Ч. 2. – Кн. 2., 1786 [репринт]. – С. 428.
10. *Баландин, С.Н.* Декабрист Г.С. Батеньков – инженер-строитель // Изв. СО АН СССР. – 1975. – № 11. – С. 92–97.
11. *История* застройки Томска. – Условия доступа : http://imhodom.ru/node/882 (дата обращения : 19.02.14).
12. *Краткая энциклопедия* по истории купечества и коммерции Сибири / Д.Я. Резун, А.С. Зуев, В.П. Зиновьев, В.А. Скубневский. – Т. 1–4. – Новосибирск, 1993–1999.
13. *Шиловский, А.* Деревянная архитектура г. Томска / А. Шиловский // Труды Томского краев. музея. – Т. I. – 1927. – С. 57–64.
14. *Макиенко, С.* Да будет Свет / С. Макиенко. – Томск : Изд-во «Красное знамя». – 2004. – № 94. – С. 1, 5.
15. *Городское самоуправление* в Западной Сибири в дореволюционный период: становление и развитие / А.П. Толочко, И.А. Коновалов, Е.Ю. Меренкова [и др.]. – Омск : ОмГУ, 2003. – 196 с.
16. Дмитриенко, Н.М. Томск: История города от основания до наших дней / Н.М. Дмитриенко. – Томск : Изд-во ТГУ, 1999. – С. 78.
17. *Деревянная архитектура* Томска. – М. : Советский художник, 1975. – 184 с.
18. *Город* Томск. – Приложение к газете «Сибирская жизнь». – Томск, 1912. – 542 с.
19. *Мараскул, А.И.* История развития уличного освещения города Томска / А.И. Мараскул, О.В. Стахеев // Сб. материалов 57-й научно-технической конференции ТГАСУ. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2011. – 410 с.
20. *Дмитриенко, Н.М.* Первые томские электростанции / Н.М. Дмитриенко // Томский календарь памятных дат и событий на 1991 г. – Томск, 1991. – С. 32.
21. *История* общественного самоуправления в Сибири второй половины XIX – начала XX века. – Новосибирск : Сова, 2006. – 351 с.
22. *Томск*. Водоканал. – Условия доступа : http://www.vodokanal.tomsk.ru/history.html (дата обращения : 19.02.14).
23. *Памятная* книжка Томской губернии за 1913 год. – Томск, 1913. – 301 с.

REFERENCES

1. *Zemlya Tomskaya. Kraevedcheskii portal* [Tomsk Land. Local history portal]. Available at : http://kraeved.lib.tomsk.ru/page/70/ (Last visited 19.02.14) (rus)
2. *Derevyannaya arkhitektura Tomska* [Wooden architecture of Tomsk]. Moscow : Sovetskii khudozhnik Publ., 1987. 151 p. (rus)
3. *Popov A.M.* Tomsk. Moscow : Stroyizdat Publishers the State Publishing House of Books on Construction and Architecture, 1959. P. 133. (rus)
4. *Boiko V.P., Sitnikova E.V., Shagov N.V., Bogdanova O.V., Zalesov V.G., Manonina T.N.* Arkhitektura gorodov Tomskoi gubernii i sibirskoe kupechestvo (XVII – nachalo XX veka) [Architecture of the Tomsk region cities and Siberian merchants (17–20th centuries)]. Tomsk : TSUAB Publ., 2011. 636 p. (rus)
5. *Romanova L.S.* Zdes' nachinalsya Tomsk. Proshloe, nastoyashchee, budushchee [Past, Present, Future of the Tomsk-City]. Tomsk : TSUAB Publ., 2004. 235 p. (rus)
6. *Zaitseva Z.A.* Derevyannaya arkhitektura Tomska [Wooden architecture of Tomsk]. Tomsk : D-print Publ., 2004. 370 p. (rus)
7. *Bogdanova O.V.* Arkhitekturnyi oblik Tomska [Architectural image of the Tomsk-City]. Tomsk : Krasnoe znamya Publ., 2005. 144 p. (rus)

8. *Manonina T.N.* Blagoustroistvo g. Tomska v kontse XVIII – nachale XX v. [Beautification of the City of Tomsk in the late 18th and early 20th century]. *Vestnik Journal of Tomsk State University,* 2010. No. 337. 211 p. (rus)
9. *Pallas P.S.* Puteshestvie po raznym mestam Rossiiskogo gosudarstva [Travel to different places of the Russian State]. Part 2. Issue 2., 1786 [reprint]. P. 428 (rus)
10. *Balandin S.I.* Dekabrist G.S. Baten'kov – inzhener-stroitel' [Decembrist G.S. Baten'kov, a civil engineer]. No. 2. Moscow, 1975. Pp. 92–97. (rus)
11. *Istoriya zastroiki Tomska* [History of Tomsk development]. Available at : http://imhodom.ru/node/882 (last visited 19.02.14). (rus)
12. *Rezun D.Ya., Zuev A.S., Zinov'ev V.P., Skubnevskii V.A*. Kratkaya entsiklopediya po istorii kupechestva i kommertsii Sibiri [Concise encyclopedia on the history of merchants and commerce in Siberia]. V. 1–4. Novosibirsk, 1993–1999. (rus)
13. *Shilovskii A.* Derevyannaya arkhitektura g. Tomska [Wooden architecture of Tomsk]. *Proc. Tomsk local history museum*. V. I. 1927. Pp. 57–64. (rus)
14. *Makienko S.* Da budet svet [Let there be light]. Krasnoe znamya Publ., 2004. No. 94. Pp. 1, 5. (rus)
15. *Tolochko A.P., Konovalov I.A., Merenkova E.Ju., et al.* Gorodskoe samoupravlenie v Zapadnoj Sibiri. [Municipal government in Western Siberia]. Omsk : Omsk State University Publ., 2003. 196 p. (rus)
16. *Dmitrienko N.M.* Tomsk: Istoriya goroda ot osnovaniya do nashikh dnei [Tomsk: history from its foundation till present days]. Tomsk : *Vestnik Journal of Tomsk State University*, 1999. P. 78. (rus)
17. *Derevyannaya arkhitektura Tomska* [Wooden architecture of Tomsk]. Moscow : Sovetskii khudozhnik Publ., 1975. 184 p. (rus)
18. *Gorod Tomsk* [The City of Tomsk]. Prilozhenie k gazete 'Sibirskaya zhizn''. Tomsk, 1912. 542 p. (rus)
19. *Marareskul A.I., Stakheev O.V.* Istoriya razvitiya ulichnogo osveshcheniya goroda Tomska [History of street lighting development of in the Tomsk city]. *Coll. Papers 57th Sci. Tech. Conf.* Tomsk : TSUAB Publ., 2011. 410 p. (rus)
20. *Dmitrienko N.M.* Pervye tomskie elektrostantsii [First Tomsk power plants]. Tomskii kalendar' pamyatnykh dat i sobytii na 1991 g. Tomsk, 1991. P. 32. (rus)
21. *Istoriya obshchestvennogo samoupravleniya v Sibiri vtoroi poloviny XIX – nachala XX veka* [The history of public government in Siberia in the 19th and early 20th century]. Novosibirsk : Sova Publ., 2006. 351 p. (rus)
22. *Tomsk. Vodokanal* [Tomsk. The water utility]. Available at : http://www.vodokanal.tomsk.ru/history.html (last visited 19.02.14). (rus)
23. *Pamyatnaya knizhka Tomskoi gubernii za 1913 god* [Memorial book of the Tomsk province, 1913]. Tomsk, 1913. 301 p. (rus)

УДК 726.38

ЛИПУГА РАИСА НИКОЛАЕВНА, аспирант,
Lynx-Ray@mail.ru
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
Украина, 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ В СОВРЕМЕННОЙ ПРАКТИКЕ ХРАМОСТРОЕНИЯ ЮГО-ВОСТОКА УКРАИНЫ

Статья посвящена проблеме развития православного храмостроения на юго-востоке Украины (в Луганской, Донецкой, Запорожской областях). Проведены комплексные исследования сохранившихся и новых храмов в исследуемых областях с целью выявления в них особенностей региональной идентичности. В ходе анализа построек и проектов, созданных в рамках регионального подхода, было установлено, что акцентирование внимания на различных аспектах приводит к появлению разных стратегий в русле региональной храмовой архитектуры.

Предлагаются эффективные пути применения сохранившихся знаний в области храмостроения, стилистических особенностей региона в современном сакральном строительстве. Данная методика содержит расширенный спектр научных и научно-практических мероприятий и рекомендаций, реализация которых на практике позволит обеспечить сохранность региональной идентичности православных храмов в современной архитектурной деятельности региона.

Ключевые слова: методика; рекомендации; региональная идентичность; системный подход.

RAISA N. LIPUGA, Research Assistant,
Lynx-Ray@mail.ru
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavin Str., Donetsk Region, 86123, Makiyivka, Ukraine

REGIONAL IDENTITY IN MODERN PRACTICE OF CHURCH CONSTRUCTION IN SOUTH-EAST UKRAINE

The article is devoted to the problem of Orthodox church construction development in the South-East Ukraine (Lugansk, Donetsk and Zaporiz'ka Oblast'). The complex research of old and new churches was carried out in these regions in order to detect their of regional identities. It is shown that attention paid to different aspects results in appearance of various strategies in regional church architecture. Effective ways are suggested in the field of expertizing stylistic features of modern sacral construction. This methodology has a wide spectrum of scientific and practical activities and recommendations, the implementation of which will allow to preserve regional identity of orthodox churches in modern architecture of the region.

Keywords: methodology; recommendations; regional identity; systems approach.

Введение

Мотивацией к разработке методики и рекомендаций по использованию региональных особенностей в строительной сфере современной архитектуры является тенденция глобализации и потери национальной и региональной идентичности. Это происходит из-за появления и широкого распространения анонимной архитектуры «стекла и бетона», которая формируется во многом без учёта природно-климатических особенностей, местных традиций и социальных факторов. Политические предпосылки 90-х гг. – распад Союза, укрепление Евросоюза, открытие границ, возможность путешествовать, появление трудовой миграции – привели к изменению взглядов на всегда существовавшие проблемы: стремлению разных групп населения сохранить самобытность и соседские отношения с другими культурами. Особенно это касается сакральных сооружений.

Региональная тематика в храмостроении отнюдь не ограничивается сферой архитектуры, поэтому следует более полно рассмотреть эту проблему, чтобы понять, как должен развиваться регионализм в современном сакральном зодчестве. Для этого необходимо максимально широко определить понятие «регионализм», «идентичность» и родственные ему термины не только в архитектуре, но и во всех смежных областях знания.

Оценка региональной идентичности в современной практике храмостроения началась с возрождения духовности в нашей стране (90-е гг.), что породило проблемы в современном сакральном строительстве. Прихожане хотят видеть узнаваемый образ храма с характерной символикой, формой и стилем, а молодые архитекторы стремятся следовать зарубежным веяниям и моде [2]. В каком стиле проектировать храм? Какой должна быть его форма при использовании современных строительных материалов?

Историк Украины М.С. Грушевский отстаивал национальные принципы строительства и общепринятые каноны [6].

Многие видные специалисты украинского зодчества, такие как В.В. Вечерский [3], Т. Геврик [5], Я. Тарас [12] и др., настаивают на сохранении идентичности в храмостроении, т. к. это национальная история [10, 11, 12]. Большое значение имеют исторические труды о развитии Донбасса. Украинскую историографию представляют Д. Багалей [1], И. Валлерштейн [4], Г. Карине [8], Ю. Дынгес [7], С. Нестерцова [9], В. Никольский [10], В. Пирко [11], Т. Фридгут [13], Л. Яруцкий [14] и др., которые отражают в своих трудах предпосылки, условия формирования сакральных сооружений, а также влияние других стран. Приоритет первого исследователя принадлежит анонимному автору Синодика (исторического памятника) Святогорского монастыря 1710 г. Именно они, изучая историю края, первыми отмечали предпосылки региональных закономерностей в сакральном строительстве.

1. Обоснование необходимости исследования региональной идентичности православного храмостроения

Анализ исследования сохранившихся и новых православных храмов позволяет утверждать, что их современное строительство в регионе стало в тупик в поиске новой формы сакральных сооружений. Исследование мотивировано социокультурным и духовным обновлением общества, проблемой сохранения культурного наследия региона, богатством культовых традиций и особенностями исторического развития областей.

Таким образом, решение существующих проблем может обеспечить только системный подход к оценке региональной идентичности храмостроения юго-востока Украины.

Цель комплексного исследования региональной идентичности православных храмов состоит в изучении процесса формирования и развития православных храмов юго-востока Украины XVIII – начала XXI в. и выявлении их стилистических особенностей с учётом географического положения и влияния соседних культур.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

– выявление предпосылок формирования и развития православных храмов, которые обусловливают стилистические направления в архитектуре сакральных сооружений исследуемых областей;

– определение основных исторических периодов строительства православных храмов;

– формулирование основных стилистических особенностей сооружений;

– выявление путей развития архитектурных традиций храмов юго-востока Украины;

– разработка методики формирования образности архитектурной идентичности православных храмов исследуемого региона;

– составление рекомендаций по использованию региональной идентичности в современной практике храмостроения на юго-востоке Украины.

2. Система исследования региональной идентичности

Выявив историко-этнографические аспекты формирования стилистических особенностей православных храмов исследуемого региона, социокультурную обусловленность, определив социальную стратификацию и типы храмов, которые строились проживающим на юго-востоке Украины населением, обозначив общие тенденции архитектурного формообразования сакральных сооружений в соответствии с историческими периодами развития региона, сформулируем основные методы исследования данной проблемы. В работе используется системный подход к исследованию:

– общенаучные методы: анализ исторических источников, просмотр литературы, изучение аналогов;

– теоретические методы: индукция и дедукция, анализ и синтез, аналогия и сопоставление, движение от абстрактного к конкретному;

– исторический метод – для изучения исследуемых явлений и процессов в динамическом развитии;

– эмпирические методы: описание, наблюдение, образы и восприятие;

– метод социологических исследований: выявление достоверной информации о социальных явлениях и процессах, которые возникают в храмах, об отношении общества к ним, анализ статистических материалов, годовых отчётов, метрических книг, экспертный опрос священнослужителей и прихожан;

– специальные методы фотограмметрии для детальной фиксации морфологически сложных и плоходоступных объектов.

Результатом исследования стало обобщение опыта теоретических и практических разработок в области храмостроения, что позволило сформировать представление о современном состоянии и разных аспектах проблемы формирования региональной идентичности православных храмов юго-востока Украины. На основе выявления региональной идентичности сформирована концепция комплексного регионального подхода к современной сакральной архитектуре исследуемого региона (рис. 1, 2).

На основе полученных результатов исследования впервые на юге и востоке Украины выявлены:

– закономерные предпосылки формирования стилистических направлений на юго-востоке Украины, которые определяют функциональную и эстетическую роль объектов исследования как социально-детерминированных архитектурных компонентов городской или сельской среды;

– впервые в исследованном регионе выявлены и сформулированы основные параметры понятия «***архитектурный стиль***» православных храмов;

– выявлены новые стили, разработана методика их исследования, а также составлена схема наличия и развития архитектурных стилей;

– выявлена их периодичность и этапность в соответствии с историческим развитием региона;

– впервые в стилистических исследованиях православных храмов указанных областей вводится такая научная категория, как «хатние» и приспособленные храмы;

– впервые разработана концепция региональной идентичности православных храмов, выявлены аспекты исторической зависимости, сформированные на исследовании специфических особенностей заграничных и национальных сакральных сооружений, проведён сравнительный анализ архитектурно-строительных школ во всех областях Украины и доказана их взаимосвязь, что позволит создавать новые формы и образы храмов на Юго-Востоке Украины;

– впервые разработана методика и предложены рекомендации использования региональных особенностей в современной практике храмостроения (рис. 3, 4).

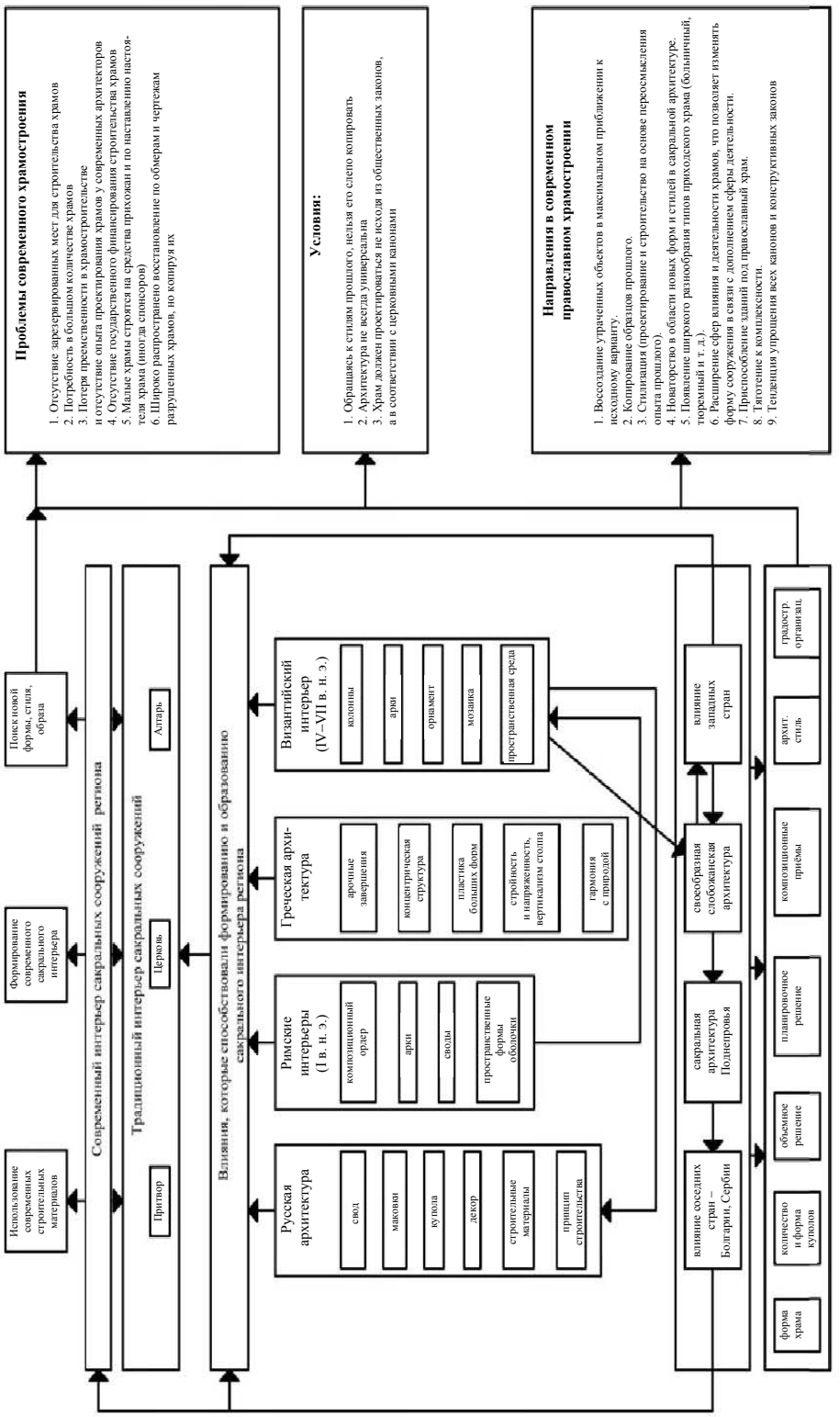


Рис. 1. Анализ современного строительства сакральных сооружений

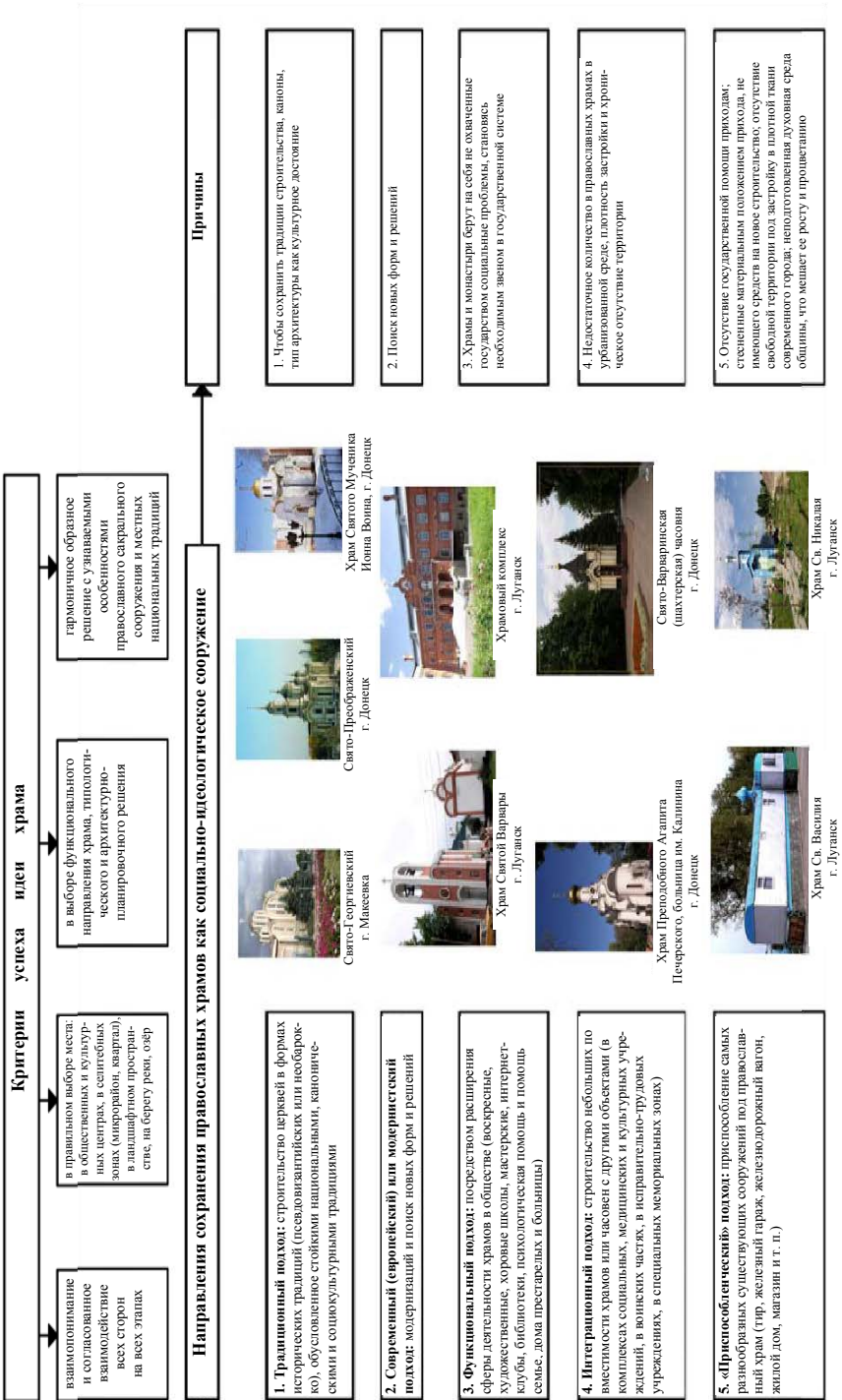


Рис. 2. Современные тенденции в строительстве православных храмов

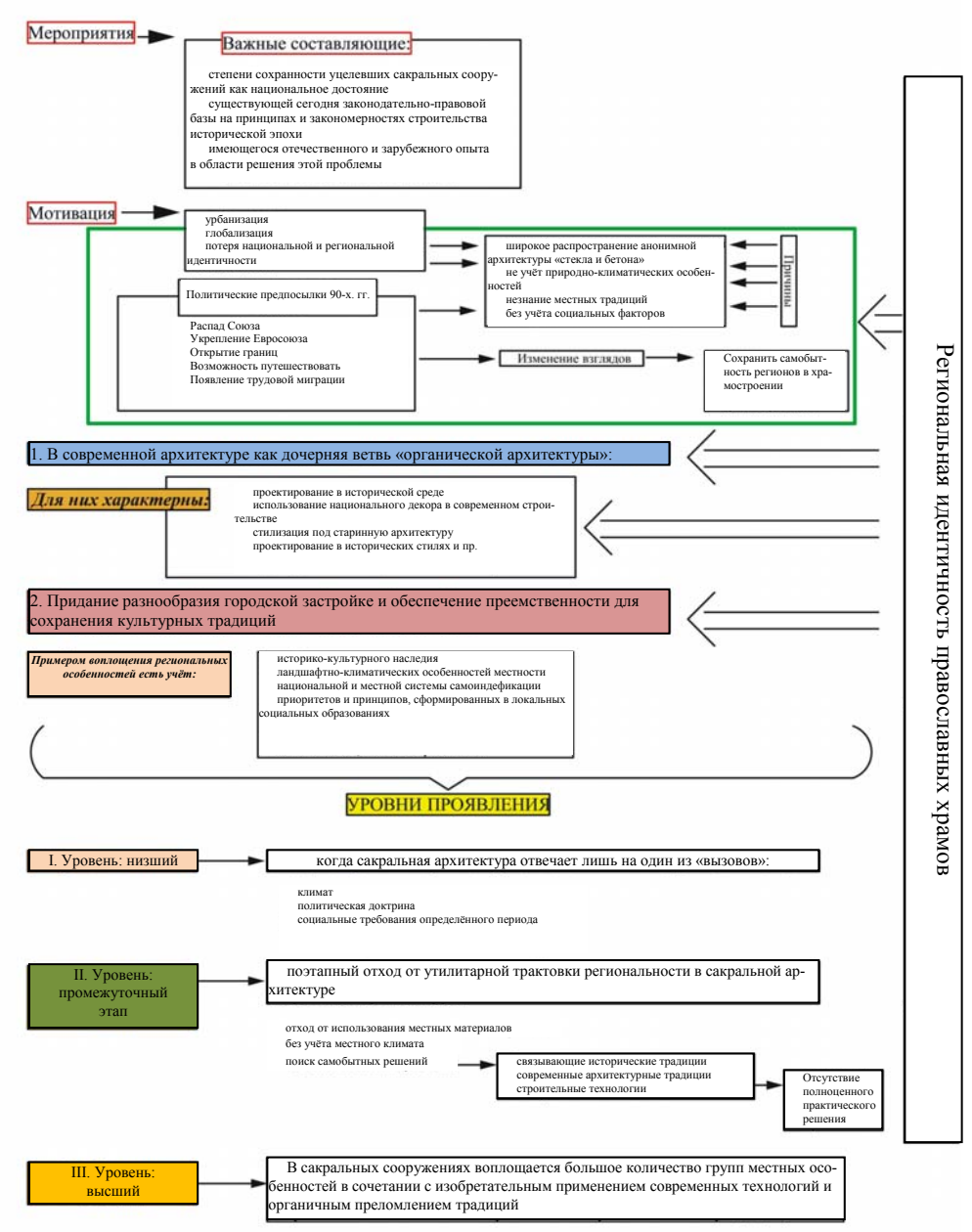


Рис. 3. Методика применения региональных особенностей в храмовом строительстве региона

Использование региональных и национальных традиций предусматривает наличие в проектных решениях православных храмов характерных элементов архитектуры того народа, который проживает в исследуемом регионе.

При формировании современных сакральных сооружений необходимо учитывать не только общие тенденции украинской архитектуры, но и уделять большое внимание национальным традициям.

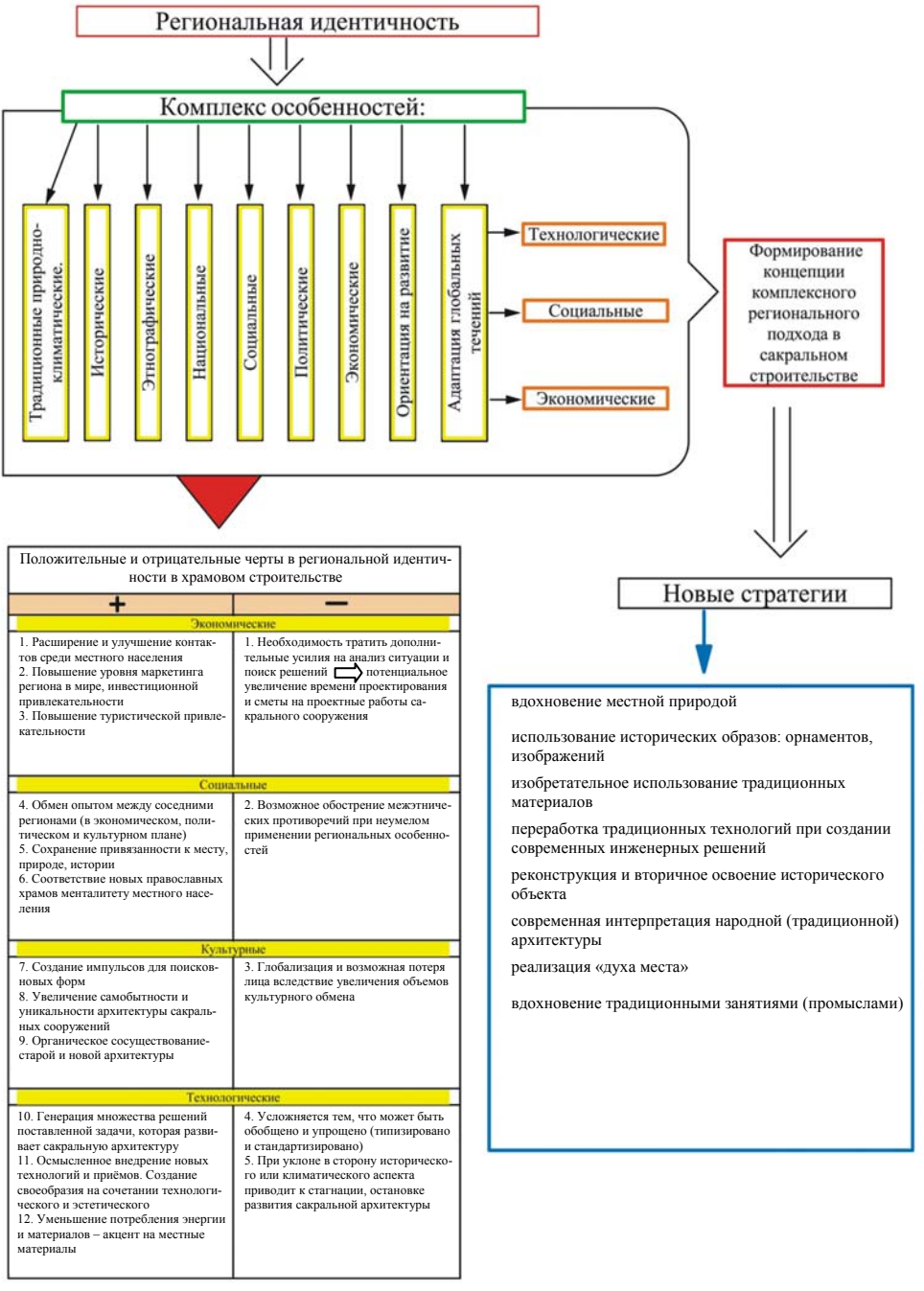


Рис. 4. Методика применения региональных особенностей в сакральном архитектурном выражении

Для этого разработаны следующие рекомендации:

1. Формирование традиционной архитектурной формы сакрального сооружения с учетом окружающей среды историко-этнографического региона.

2. Использование исключительно местных материалов, учитывая их конструктивно-технические данные, и архитектурно-художественных приемов в строительстве народной храмовой архитектуры.

3. Отражение мотивов местной народной архитектуры (например, греческой, сербской, русской) – этнографические черты вышивок, рушники в интерьере храма. Это особенно заметно в орнаментике, форме куполов, росписи зала.

4. Творческое решение внутреннего пространства на чисто белых стенах, свойственных украинским хатам (храмы «хатнего» стиля и приспособленные):

– яркие орнаменты, которые так же уместны, как и классические росписи; например, в сербской церкви используются традиционные орнаменты с характерной цветовой гаммой;

– ажурные формы ограждений лестницы; облицованные тёмно-красной и коричневой краской панели;

– голубой фон купола без колонн в сочетании с белыми стенами в интерьерах главных залов;

– живописные полотна на историческую тему, которые дополняют национальный колорит здания, придавая интерьерам исторический контекст;

– ганки (крыльцо) с гульбищем, характерные для русских изб ещё в древности, окна второго этажа, керамические колонки, карнизы;

– своеобразная трактовка неорусского стиля – красочный кирпичный храм, сочетание красного кирпича стен с белыми деталями (наличники окон, портал входа, карниз), что создаёт сочный колорит;

– украшение завершения купола и барабана орнаментальным карнизом и резьбой по металлу, художественный образ здания завершает прекрасная мозаика святого у входа в храм.

Особенности использования национальных традиций в архитектуре православных храмов определяются рядом противоречивых факторов. Следует отметить, что такие известные архитекторы, как А.В. Щусев, А.П. Новицкий, В.Г. Кричевский, К.Н. Жуков, Н. Шумицкий и др., поставили теоретически и попытались решить практически проблему национальной формы архитектуры на основе изучения исторических и архитектурно-этнографических памятников прошлого.

5. Характерное нововведение в храмовом зодчестве при решении архитектуры православных храмов – это приёмы организации пространства (многоярусность, живописность объёмов и масс, силуэт, акцентирование входов), декоративного решения (майоликовые вставки, росписи, полихромность), которые выкристаллизовались в народном творчестве прошлого и могут быть трансформированы в будущее.

Выводы

Проведённое автором исследование региональной идентичности позволяет утверждать, что решение существующих проблем в современной практике храмостроения на юго-востоке Украины может обеспечить предложенная концепция комплексного регионального подхода к современной сакральной архитектуре исследуемого региона.

Предложена методика применения региональных особенностей в храмовом строительстве региона, учитывающая современные тенденции, уровни развития, положительные и отрицательные черты в региональной идентичности храмостроения.

Автором рассмотрены ключевые задачи в исследовании региональной идентичности православных храмов. На основе системного анализа исследования сформировано представление о современном состоянии и разных аспектах проблемы, разработана концепция комплексного регионального подхода к современной сакральной архитектуре исследуемого региона. Кроме того, подробно рассмотрены уровни проявления региональной идентичности, её положительные и отрицательные черты.

Разработанные автором и реализуемые в предложенной форме мероприятия по использованию региональной идентичности позволяют более органично и эффективно решить проблему сохранения исторического и культурного наследия, а также обозначить храмостроение как современное направление архитектурной деятельности региона.

Библиографический список

1. *Багалей, Д.И.* Очерки из истории колонизации степной окраины Московского государства / Д.И. Багалей. – М. : Из Императорского об-ва истории и древностей России, 1887. – С. 87.
2. *Васильев, О.В.* Домовые храмы вузов и действующее российское законодательство / О.В. Васильев // Доклад на Первом фестивале православной студенческой молодёжи России. – Условия доступа : http: // www. pravoslavie.ru/ jurnal/ donhram.htm/ 14.10/ 2002.
3. *Вечерский, В.В.* Утерянные объекты архитектурных памятников Украины / В.В. Вечерский. – Киев : НАІТІАМ, 2002. – 592 с.
4. *Валлерштейн, И.* Справочник Юзовки / И. Валлерштейн. – Юзовка, 1908. – С. 353.
5. *Геврик, Т.* Потерянные архитектурные памятники Киева: [Каталог] / Т. Геврик. Нью-Йорк; Киев : Пам'ятки України. – 1991. – Вып. № 4. – С. 64**.**
6. *Грушевский, М.С.* Из истории религиозной мысли на Украине (евангельское объединение в Северной Америке) / М.С. Грушевский. – Киев : Освита, 1992. – С. 192.
7. *Дынгес, Ю.* Этапы, специфика и перспективы ренессанса в Украине / Ю. Дынгес // Межэтнические связи: История, этнография, культурные связи в Донбассе. – Донецк : ДонГУ, 2000. – С. 118–130.
8. *Геворян, К.* Переселение армян на территорию Юго-Восточной Украины / К. Геворян // Юго-Восточная Украина : с древности и до XXI ст.: материалы и тезисы докладов. – Донецк, 2007. – С. 78–79.
9. *Нестерцова, С.* Роль церкви в развитии народного образования в Донбассе в конце XIX века / С. Нестерцова // Донбасс: прошлое, настоящее и будущее: тезисы докладов и сообщений III региональной научно-практической конференции (22.19.1994). – Донецк : Лебедь, 1995. – С. 38–41.
10. *Никольский, В.Н.* Религиозные течения и группировки в Донбассе середины 1920-х гг. / В.Н. Никольский // Новые страницы в истории Донбасса. Кн. 3. – Донецк, 1994. – С. 42–56.
11. *Пирко, В.* Заселение Донеччины в XVI–XVIII вв./ В. Пирко, В.А. Пирко. – Донецк, 1995. – С. 27.
12. *Тарас, Я.* Украинская сакральная деревянная архитектура: словарь-справочник / Я. Тарас. – Львов : ИН НАНУ, 2006. – 584 с.
13. *Фридгут, Т.* Юзовка и революция / Т. Фридгут // Новые страницы в истории Донбасса. Кн. 1. Донецк, 1992. – С. 23–67.
14. *Яруцкий, Л.* Мариупольские храмы вчера и сегодня / Л. Яруцкий. – Мариуполь, 1991. – С. 245.

REFERENCES

1. *Bagalei D.I.* Ocherki iz istorii kolonizatsii stepnoi okrainy Moskovskogo gosudarstva [Historical essays on colonization of the steppe suburbs of the Moscow state]. Moscow : Iz Imperatorskogo obshhestva istorii i drevnostei Rossii, 1887. P. 87.(rus)
2. *Vasil'ev O.V.* Domovye khramy vuzov i deistvuyushchee rossiiskoe Zakonodatel'stvo [Higher school churches and modern Russian legislation]. The Report on the First festival orthodox student youth to Russia. Available at : http://www.pravoslavie.ru/jurnal/donhram.htm/ (Last visited 14.10/2002). (rus)
3. *Vecherskii V.V.* Uteryannye ob'ekty arkhitekturnykh pamyatnikov Ukrainy [Lost objects of Ukrainian architecture]. Kiev : NAITIAM Publ., 2002. 592 p.
4. *Vallershtein I.* Spravochnik Yuzovki [Reference book of Yuzovka]. Yuzovka, 1908. P. 353. (ukr)
5. *Gevrik T.* Poteryannye arkhitektrnye pamyatniki Kieva (Katalog) [Lost architectural monuments of Kiev (Catalogue)]. *Pam'yatki Ukraïni*. New-York; Kiev, 1991. No. 4. P. 64. (rus)
6. *Grushevskiy M.S.* Iz istorii religioznoi mysli na Ukrain (evangel'skoe ob"edinenie v Severnoi Amerike) [History of the religious thought on Ukraine (Ukrainian evangelic association in North America)]. Kiev : Osvita , 1992. P. 192. (rus)
7. *Dynges Yu.* Etapy, spetsifika i perspektivy renessansa v Ukraine [Renaissance stages, specifics, and prospects in Ukraine]. Mezhetnicheskie svyazi: Istoriya, etnografiya, kul'turnye svyazi v Donbasse [Interethnic relationships: history, ethnography, cultural relationship in Donbas]. Donetsk: Donetsk State University Publ., 2000. Pp. 118–130. (ukr)
8. *Gevoryan K.* Pereselenie armyan na teritoriyu Yugo-Vostochnoi Ukrainy [Transmigration Armenians in the South-East Ukraine]. Yugo-Vostochnaya Ukraina: s drevnosti i do XX st.: materialy i tezisy dokladov. [South-East Ukraine: from remote ages to the 21st century. Thesis reports]. Donetsk, 2007. Pp. 78–79. (rus).
9. *Nestertsova S.* Rol' tserkvi v razvitii narodnogo obrazovaniya v Donbasse v kontse 19 veka [The role of Orthodox church in development of public education in Donbas late in the 19th Century]. *Proc. Sci. Conf. 'Donbas: past, present and future' (22.19.1994).* Donetsk : Lebed', 1995. Pp. 38–41. (rus)
10. *Nikol'skii V.N.* Religioznye techeniya i gruppirovki v Donbasse serediny 1920-kh gg. [Religious sects and groups in Donbas in the 20s of the 20th Century]. Novye stranitsy v istorii Donbassa [New pages of Donbas history]. Donetsk, 1994. No. 3. Pp. 42–56. (rus)
11. *Pirko V., Pirko V.A.* Zaselenie Donechchiny v 16–18 vv. [Settlement of Donetsk region in the 16–18th centuries]. Donetsk, 1995. P. 27. (ukr)
12. *Taras Ja.* Ukrainskaya sakral'naya derevyannaya arkhitektura: slovar'-spravochnik [Ukrainian church wooden architecture (illustrated dictionary)]. Lvov : Institute of Ethnology Ukraine of the National Academy of Sciences, 2006. 584 p. (ukr)
13. *Fridgut T.* Yuzovka i revolyutsiya [Yuzovka and revolution]. Novye stranitsy v istorii Donbassa [New pages of Donbass history]. Donetsk, 1992. Pp. 23–67.
14. *Yarutskii L.* Mariupol'skie khramy vchera i segodnya [Mariupol Churches yesterday and today]. Mariupol, 1991. P. 245. (ukr).

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.046:539.4

ЛЯХОВИЧ ЛЕОНИД СЕМЕНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
lls@tsuab.ru, lsl@sibmail.com
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ПОВЫШЕНИЕ ПЕРВОЙ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОПТИМАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВНЕШНЕЙ МАССЫ

В предыдущих работах автора предложены методы изменения первой собственной частоты путем оптимизации величин и мест расположения дополнительных или снимаемых масс. В данной статье рассматривается метод повышения первой частоты собственных колебаний упругой системы до заданного значения, не противоречащего ограничениям задачи, путем оптимального изменения только расположения внешней массы на системе. При этом суммарная величина внешних масс должна сохраниться, а величина перемещаемой по системе массы быть минимальной.

Ключевые слова: частота собственных колебаний; массы; оптимизация; особые свойства.

LEONID S. LYAKHOVICH, DSc, Professor,
lls@tsuab.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

EIGEN FREQUENCY INCREASED BY OPTIMUM CHANGE OF THE EXTERNAL LOAD POSITION

In the preceding works the author suggested methods of the first frequency change by optimizing the value and place of additional or removed loads. This paper presents a method of increasing eigen frequency in an elastic system up to the given value which satisfies the problem situation. The increase of first eigen frequency is provided by an optimum change of only external load applied to the system. Herewith, the total external load must be retained while the load displacement through the system must be minimum.

Keywords: eigen frequency; mass; optimization; special properties.

В работах [1, 2, 3] рассмотрены две задачи. Поясним эти задачи на примере, приведенном в [3, гл. 4, §6) и [4]. За объект иллюстрации принят двухпролетный стержень постоянного сечения. Схема стержня и пролеты показаны на рис. 1. Сечение стержня – составной двутавр. Размеры сечения – высота b_1 = 0,2 м, ширина b_2 = 0,12 м, толщина стенки δ_{st} = 0,02 м, толщина полки δ_P = 0,02 м. Модуль упругости материала E = 206 000 МПа. Удельная масса ρ = 7850 кг/м^3. Принята дискретная модель из 24 участков. Стержень несет внешнюю распределенную массу интенсивностью в первом пролете m = 100 кг/м, а во втором m = 120 кг/м. Распределенная масса приведена к узлам и составляет соответственно в первом пролете $m[i] = (100 \cdot 5{,}25)/10{,}5 = 50$ кг, а во втором – $m[i] = (120 \cdot 6{,}75)/13{,}5 = 60$ кг. С учетом массы стержня в первом пролете $m[i]$ = 81,40 кг, а во втором $m[i]$ = 91,40 кг. Величина первой круговой собственной частоты равна $\omega[1] = 80{,}20$ с$^{-1}$.

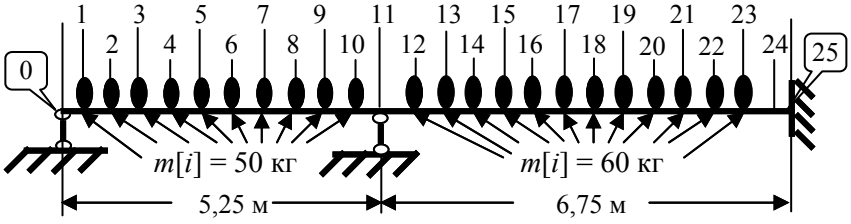


Рис. 1

В первой задаче *требуется выбрать из числа возможных места размещения, количество и величины дополнительных масс* ($m1_d[i]$ (i = 1, 2, …, $n1$)) *таким образом, чтобы первая собственная частота* $\omega[1]$ *не оказалась меньше величины заданного значения* ω_{01}, *не противоречащего ограничениям задачи*

$$\omega[1] \geq \omega_{01}, \tag{1}$$

а сумма дополнительных масс

$$M1_d = \sum_{i=1}^{n1} m1_d[i] \tag{2}$$

была бы максимальной. При этом дополнительные массы должны удовлетворять условиям

$$dm1[i] \geq m1_d[i] \geq 0 \quad (i = 1, 2, \ldots, n1). \tag{3}$$

Здесь $dm1(i)$ – заданные значения, ограничивающие величины дополнительных масс.

Во второй задаче *требуется выбрать из числа возможных места, количество и величины снимаемых масс* ($m2_d[i]$ (i = 1, 2, …, $n2$)) *таким образом, чтобы первая собственная частота* $\omega[1]$ *оказалась не меньше величины заданного значения* ω_{02}, *не противоречащего ограничениям задачи*

$$\omega[1] \geq \omega_{02}, \tag{4}$$

а сумма снимаемых масс

$$M2_d = \sum_{i=1}^{n1} m2_d[i] \qquad (5)$$

была бы минимальной. При этом снимаемые массы должны удовлетворять условиям

$$dm2[i] \ge m2_d[i] \ge 0 \quad (i = 1, 2, \ldots, n2). \qquad (6)$$

Здесь $dm2[i]$ – заданные значения, ограничивающие величины снимаемых масс.

Ограничения (3) и (6) определяются эксплутационными и техническими параметрами системы. Так, в первой задаче дополнительные массы не должны нарушать функциональное назначение сооружения (не нарушать ограничений по прочности, жесткости, устойчивости, не загромождать пространство сооружения и т. д.). Во второй задаче снимаемая в *i*-м узле масса не может быть больше внешней массы, действующей в этом узле ($m2_d[i] \le m[i]$). Кроме того, здесь могут быть технологические и функциональные ограничения, позволяющие снимать только часть действующей внешней массы. Величины $dm1[i]$ и $dm2[i]$ принимаются в доле от действующей в соответствующем узле внешней массы

$$dm1_d[i] = \alpha1[i] \cdot m[i], \; dm2_d[i] = \alpha2[i] \cdot m[i]. \qquad (7)$$

За возможные места размещения и снятия масс в данном примере приняты все узловые точки, кроме опорных (*0*, *11*, *24*, *25* – рис. 1).

Выбор значений ω_{01} и ω_{02} определяется, с одной стороны, требованиями к сооружению (например, необходимостью изменения интервала в спектре собственных частот), а с другой стороны – ограничениями (3) и (6).

Проиллюстрируем на рассматриваемом примере влияние ограничений на выбор значений ω_{01} и ω_{02}. Обозначим отношения первой круговой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80{,}20\ с^{-1}$ к ω_{01} и ω_{02}. $\omega_{01}/\omega[1] = \alpha_\omega 1$ и $\omega_{02}/\omega[1] = \alpha_\omega 2$. Если принять для каждой задачи одинаковые предельные значения доли снимаемых или дополнительных внешних масс (соответственно $\alpha1[i] = \alpha1$ и $\alpha2[i] = \alpha2$), то влияние ограничений (3) и (6) иллюстрируются графиками, приведенными на рис. 2.

На оси ординат – значения коэффициентов уменьшения ($\alpha_\omega 1$ для первой задачи) или увеличения ($\alpha_\omega 2$ для второй задачи) первой собственной частоты исходной системы, на оси абсцисс – коэффициенты $\alpha1$ и $\alpha2$, определяющие предельные доли снимаемых или дополнительных внешних масс. Коэффициенты $\alpha_\omega 1$ и $\alpha_\omega 2$, определяющие значения $\omega_{01} = \alpha_\omega 1 \cdot \omega[1]$ для первой задачи и $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$ для второй, при заданных величинах $\alpha1$ и $\alpha2$ могут быть выбраны любыми в интервале между линиями *1* и $\alpha_\omega 1$ для первой задачи и *1* и $\alpha_\omega 2$ для второй. Так, если в данном примере принять для первой задачи $\alpha1 = 1$, то решение возможно при значениях $\alpha_\omega 1$ в пределах интервала внутри отрезка *ab*. Если для второй задачи в данном примере принять $\alpha2 = 0{,}5$, то решение возможно при значениях $\alpha_\omega 2$ в пределах интервала внутри отрезка *cd*.

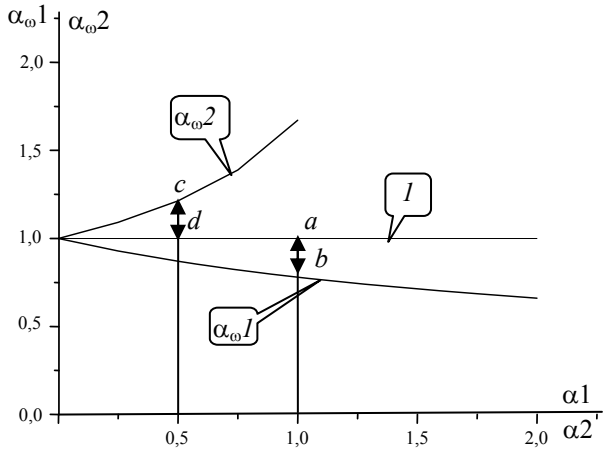


Рис. 2

Предложенные в работах [1, 2, 3] и приведенные здесь методы изменения первой частоты собственных колебаний основаны на частичном догружении или частичной разгрузке сооружения. В реальности встречаются ситуации, когда вся внешняя масса должна оставаться на сооружении.

В данной статье рассматривается *метод повышения первой частоты собственных колебаний упругой системы до заданного значения, не противоречащего ограничениям задачи, путем оптимального изменения только расположения внешней массы. При этом суммарная величина внешних масс должна сохраниться, а величина перемещаемой по системе массы быть минимальной.*

Метод оптимального изменения расположения внешних масс базируется на последовательном использовании алгоритмов решения приведенных выше задач (алгоритмы разработаны в [1, 2, 3]).

Пусть первая частота собственных колебаний системы ω[1]. Требуется повысить ее до $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$. Заданы ограничения на величины дополнительных и снимаемых масс (3) и (6).

Основная идея метода состоит в том, что вначале, используя алгоритм решения второй задачи, повышаем первую собственную частоту до величины, большей, чем намеченная ($\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1]$). Эта задача решается снятием минимальной величины внешней массы ($M2_d$). Затем, используя алгоритм решения первой задачи, добавлением ранее снятых масс ($M2_d$) возвращаем частоту к намеченной величине $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$. При этом снятие и добавление масс будет реализовано на разных участках системы.

Минимизация величины перемещаемых масс достигается регулированием значения δ. Выбор величины δ, обеспечивающей минимум перемещаемых масс, зависит от ограничений на величины снимаемых и дополнительных масс (3) и (6). Очевидно, что, чем больше значения $dm1_d[i]$ и $dm2_d[i]$, тем

больше свободы в выборе величин дополнительных и снимаемых масс и тем меньшим перемещением масс может быть решена поставленная задача.

Покажем зависимость величины перемещаемых масс от значений δ и ограничений на примере, приведенном на рис. 1.

На рис. 3 показаны графики зависимости величины снимаемых при $dm2[i]=0,6$ (линия *1*) и добавляемых масс (линии *2*, *3*, *4*) от величины δ и ограничений $\alpha 1[i]=\alpha 1$.

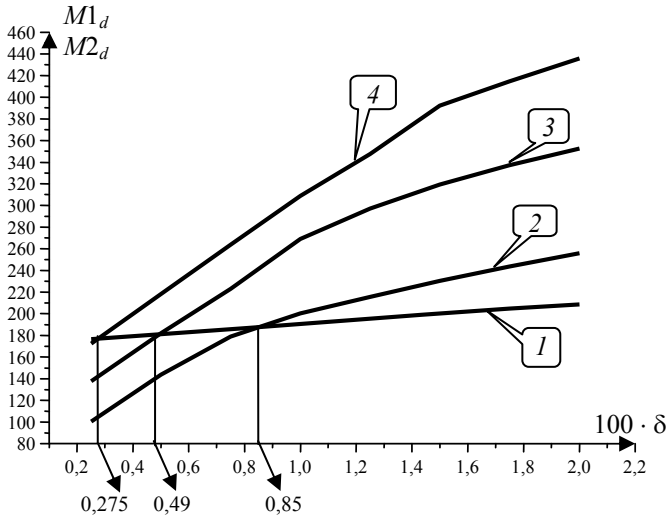


Рис. 3

На оси абсцисс откладываются $100 \cdot \delta$. На оси ординат показаны величины масс (дополнительных и снимаемых – $M1_d$, $M2_d$).

В рассматриваемом примере (см. рис. 1) в [3] и [4] решалась задача об увеличении первой собственной частоты на 10 % ($\alpha_\omega 2=1,1$) при ограничении (6) величин снимаемых масс $dm2[i]=0,6$. Решение было реализовано снятием 171,5880 кг массы. На графике линия *1* показывает зависимость величины снимаемой массы от значения δ при $dm2[i]$ = 0,6. Линии *2*, *3*, *4* показывают при разных значениях ограничений $\alpha 1[i]=\alpha 1$ зависимость величины дополнительной массы, необходимой для возвращения частоты от значения $\omega_{02}=(\alpha_\omega 2+\delta)\omega[1]$ к намеченной ранее величине $\omega_{02}=\alpha_\omega 2\cdot\omega[1]$ $(\alpha_\omega 2=1,1)$. Линия *2* построена при $\alpha 1[i]=0,6$. Линия *3* – при $\alpha 1[i]=1$. Линия *4* – при $\alpha 1[i]=1,4$. Точки пересечения линий *2*, *3*, *4* с линией *1* соответствуют значениям δ, при которых реализуется решение задачи, т. е. величины снятых и дополнительных масс равны между собой. Из графика видно, что, чем больше величина ограничения $\alpha 1$, тем меньше значение δ и меньше величина перемещаемых масс. Так, при $\alpha 1[i]=0,6$ $\delta=0,0085$, а $M1_d=M2_d=188,0$ кг. При

$\alpha 1[i]=1 \quad \delta=0,0049$, а $M1_d = M2_d = 180,9$ кг. При $\alpha 1[i]=1,4 \quad \delta=0,00275$, а $M1_d = M2_d = 176,9$ кг .

С учетом приведенных выше зависимостей алгоритм решения задачи о *повышении первой частоты собственных колебаний упругой системы до заданного значения, не противоречащего ограничениям задачи, путем оптимального изменения только расположения внешней массы на сооружении* выполняется по этапам.

1. Устанавливаем отсутствие противоречий значения коэффициента повышения первой собственной частоты исходной системы ($\alpha_\omega 2$) ограничениям задачи. Если принять предельно большими величины всех масс, которые могут быть сняты ($m2_d[i]=m2[i]$), и при этом первая собственная частота системы со снятыми массами окажется не меньше принятого значения $\omega_{02}=\alpha_\omega 2\cdot\omega[1]$, то коэффициент $\alpha_\omega 2$ не противоречит условиям задачи. Если $\alpha_\omega 2$ противоречит ограничениям задачи, то либо ограничения должны быть изменены, либо, если это невозможно, то $\alpha_\omega 2$ необходимо уменьшить. Величину снятых при этом масс обозначим $M2_d$.

2. Как показано выше, чем больше величина ограничения $\alpha 1$, тем меньше значение δ и меньше величина перемещаемых масс. Учитывая зависимость величины перемещаемых масс от ограничений первой задачи, выбираем максимально большие возможные значения $\alpha 1[i]$. При таком выборе $\alpha 1[i]$ значение δ, при котором величины снятых и дополнительных масс равны, обеспечивает минимум перемещаемых масс.

3. Задаем начальный интервал поиска минимального допустимого значения δ. Обозначим краевые значения интервала поиска δ, как δл и δп. За левую границу интервала можно вначале принять δл = 0 или близкое к нему значение. Если принято δл ≠ 0, повышаем исходную первую частоту до $\omega_{02}=(\alpha_\omega 2+\delta л)\omega[1]$ снятием масс, а затем с учетом снятых масс понижаем частоту дополнительными массами до $\omega_{02}=\alpha_\omega 2\cdot\omega[1]$. Если величина снятых масс $M2_d$ окажется меньше дополнительных $M1_d$, то выбранное значение δ принимается за правую границу, а δл необходимо уменьшить. Если $M2_d > M1_d$, то выбранное значение δ принимается за левую границу. Величина δп определяется пробными расчетами. При $\omega_{02}=(\alpha_\omega 2+\delta п)\omega[1]$ устанавливаем отсутствие противоречий увеличенного значения коэффициента повышения первой собственной частоты исходной системы ($\alpha_\omega 2+\delta п$) ограничениям задачи. Если принять предельно большими величины всех масс, которые могут быть сняты ($m2_d[i]=m2[i]$), и при этом первая собственная частота системы со снятыми массами окажется не меньше принятого значения $\omega_{02}=(\alpha_\omega 2+\delta п)\omega[1]$, то коэффициент ($\alpha_\omega 2+\delta п$) не противоречит условиям задачи. Величина снятых масс при этом $M2_d$. Если ($\alpha_\omega 2+\delta п$) противоречит ограничениям задачи, то величину δп необходимо уменьшить. Если коэффициент ($\alpha_\omega 2+\delta п$) не противоречит задаче, то решаем вторую задачу о понижении первой частоты от значения $\omega_{02}=(\alpha_\omega 2+\delta п)\omega[1]$ до величины

$\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$. Если при этом величина дополнительных масс $M1_d$ окажется меньше, чем величина снятых масс, то принимаем δп за левую границу интервала δл = δп, а первоначально принятое значение δп следует увеличить. Если $M1_d > M2_d$, то δп принимается за правую границу интервала поиска минимального допустимого значения δ. После установления начального интервала переходим к пошаговому поиску искомой величины δ при максимально больших возможных ограничениях $\alpha 1[i]$.

4. Для определения δ на каждом шаге можно использовать способ деления отрезка поиска пополам. Принимаем величину δ в середине отрезка исходной системы ω[1] до значения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1]$. Запоминаем величину суммы снятых масс $M2_d$. Решаем задачу о снижении первой собственной частоты системы со снятыми массами от $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1]$ до первоначально намеченного повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$. Запоминаем величину дополнительных масс $M1_d$. Если $M1_d > M2_d$, то принимаем δ за правую границу нового интервала поиска δп = δ. Если $M1_d < M2_d$, то принимаем δ за левую границу нового интервала поиска δл = δ. Теперь интервал поиска оказывается суженным в два раза. В суженном интервале выбираем новую величину δ в середине этого интервала и действуем аналогично предыдущему, получая на каждом шаге сужающиеся двусторонние оценки искомого значения δ. Процесс заканчивается, когда оценки искомого значения δ станут достаточно узкими или когда абсолютная величина разности $\left|M1_d - M2_d\right|$ будет достаточно малой.

Иллюстрацию алгоритма представим на примере балки, показанной на рис. 1. Иллюстрацию представляем по этапам.

1. В работах [3] и [4] для этой системы решены задачи о повышении первой собственной частоты на 10 % $(\alpha_\omega 2 = 1{,}1)$ снятием части внешних масс. При этом ограничения на величины снимаемых масс были приняты $\alpha 2[i] = 0{,}6$. Величина первой круговой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80{,}20$ с$^{-1}$. Повышенная частота $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 1{,}1 \cdot 80{,}20 = 88{,}22$ с$^{-1}$. Снятые массы показаны снизу схемы балки на рис. 4, *а*. Сумма снятых масс $M2_d$ = 171,5880 кг. Так как увеличенная частота оказалась не меньше принятого значения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$, ограничения $\alpha_\omega 2 = 1{,}1$ и $\alpha 2[i] = 0{,}6$ не противоречат условиям задачи.

2. Примем за максимально возможные ограничения величин дополнительных масс $\alpha 1[i] = 1{,}4$.

3. Задаем начальный интервал поиска. Проверяем, может ли δ = 0,0005 быть принято за левую границу интервала. Для этого снятием масс повышаем исходную первую частоту ω[1] = 80,20 с$^{-1}$ до $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = 80{,}2(1{,}1 + 0{,}0005) = 88{,}26$ с$^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d$ = 172,5371 кг. Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80{,}2 \cdot 1{,}1 = 88{,}22$ с$^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1{,}1 / (1{,}1 + 0{,}0005) = 0{,}9995457$, а величина дополнительных масс $M2_d$ = 64,2229 кг. Так как $M2_d > M1_d$, то выбранное значение δ принимается за левую границу. Итак, δл = 0,0005. Проверим, может ли

$\delta = 0{,}005$ быть принято за правую границу интервала. Для этого повышаем снятием масс исходную первую частоту $\omega[1] = 80{,}20$ с$^{-1}$ до $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = 80{,}2(1{,}1 + 0{,}005) = 88{,}62$ с$^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d = 181{,}0718$ кг. Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80{,}2 \cdot 1{,}1 = 88{,}22$ с$^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1{,}1/(1{,}1 + 0{,}005) = 0{,}995475$, а величина дополнительных масс $M1_d = 218{,}1954$ кг. Так как $M2_d < M1_d$, то выбранное значение δ принимается за правую границу. Итак, $\delta л = 0{,}005$.

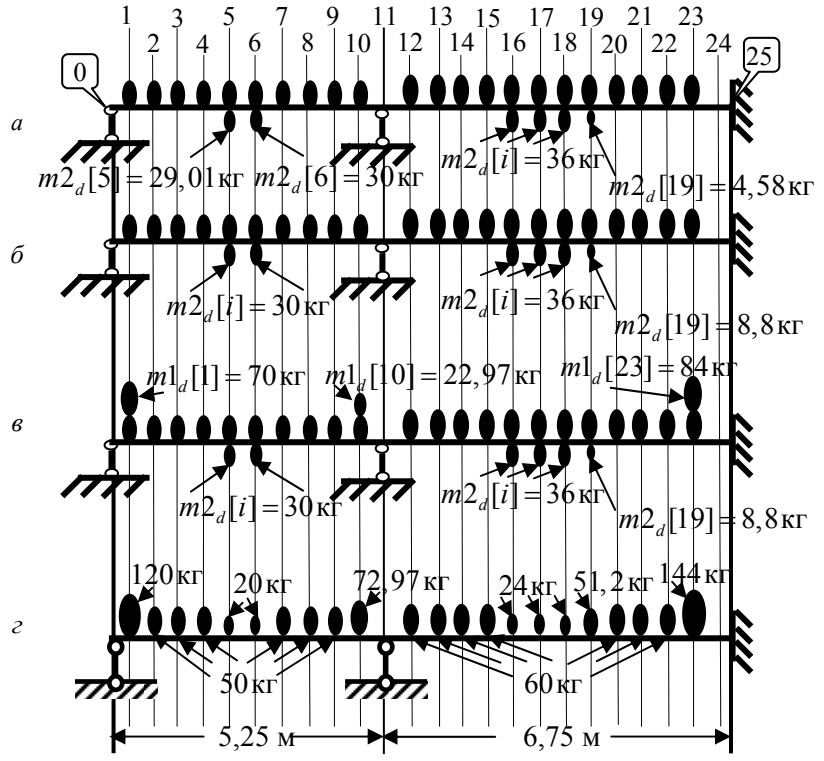


Рис. 4

4. Принимаем величину δ в середине отрезка поиска $\delta = \dfrac{\delta п + \delta л}{2}$ или $\delta = (0{,}0005 + 0{,}005)/2 = 0{,}00275$. Решаем задачу о повышении первой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80{,}20$ с$^{-1}$ до значения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = (1{,}1 + 0{,}00275)80{,}2 = 88{,}44$ с$^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d = 176{,}8015$ кг. Снятые массы показаны снизу схемы балки на рис. 4, *б*. Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80{,}2 \cdot 1{,}1 = 88{,}22$ с$^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1{,}1/(1{,}1 + 0{,}00275) = 0{,}99751$, а величина дополнительных масс $M1_d = 176{,}9723$ кг. Дополнительные массы показаны над внешними массами на рис. 4, *в*. Разность абсолют-

ных величин $|M1_d - M2_d|$ составляет всего $(|176,9723 - 176,8015| / 176,9723) \times$ $\times 100 = 0,1\%$, что позволяет считать в данном примере задачу о *повышении первой частоты собственных колебаний упругой системы до заданного значения, не противоречащего ограничениям задачи, путем оптимального изменения только расположения внешней массы решенной.* Оптимальное расположение масс показано на рис. 4, *г*. Вверху схемы обозначены измененные массы, а внизу – массы, величины которых не изменились. Общая величина внешних масс 1220 кг, а перемещенных – около 176,9 кг.

Величина перемещаемой массы может быть уменьшена, если допустимо увеличение значений $dm1_d[i] = \alpha 1[i] \cdot m[i]$ и $dm2_d[i] = \alpha 2[i] \cdot m[i]$ ограничений на дополнительные и снимаемые массы.

Увеличим в приведенном выше примере ограничения $dm1_d$ и $dm2_d$. Пусть $dm1_d[i] = \alpha 1[i] \cdot m[i] = 1,5 \cdot m[i]$, а $dm2_d[i] = \alpha 2[i] \cdot m[i] = 0,7 \cdot m[i]$. Тогда:

1. Величина первой круговой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$. Повышенная частота $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 1,1 \cdot 80,20 = 88,22\,\text{с}^{-1}$. Сумма снятых масс $M2_d$ = 165,48 кг ($m2_d[5] = 4,48$ кг, $m2_d[6] = 35$ кг, $m2_d[16] = 42$ кг, $m2_d[17] = 42$ кг, $m2_d[18] = 42$ кг). Так как увеличенная частота оказалась не меньше принятого значения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1]$, ограничения $\alpha_\omega 2 = 1,1$ и $\alpha 2[i] = 0,7$ не противоречат условиям задачи.

2. За максимально возможные ограничения величин дополнительных масс принята величина $\alpha 1[i] = 1,5$.

3. Проверим, может ли δ = 0,0005 быть принято за левую границу интервала. Для этого снятием масс повышаем исходную первую частоту $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$ до $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = 80,2(1,1 + 0,0005) = 88,26\,\text{с}^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d$ = 166,35 кг ($m2_d[5]$ = 5,5 кг, $m2_d[6]$ = 35 кг, $m2_d[16]$ = 42 кг, $m2_d[17]$ = 42 кг, $m2_d[18]$ = 42 кг). Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80,2 \cdot 1,1 =$ $= 88,22\,\text{с}^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1,1 / (1,1 + 0,0005) = 0,9995457$, а величина дополнительных масс $M2_d$ = 68,56 кг ($m1_d[23] = 68,56$ кг). Так как $M2_d > M1_d$, то выбранное значение δ принимается за левую границу. Итак, δл = 0,0005. Проверим, может ли δ = 0,004 быть принято за правую границу интервала. Для этого повышаем снятием масс исходную первую частоту $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$ до $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = 80,2(1,1 + 0,004) = 88,54\,\text{с}^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d$ = 172,47 кг ($m2_d[5]$ = 11,47 кг, $m2_d[6]$ = 35 кг, $m2_d[16]$ = 42 кг, $m2_d[17]$ = 42 кг, $m2_d[18]$ = 42 кг). Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения: $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80,2 \cdot 1,1 = 88,22\,\text{с}^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1,1 / (1,1 + 0,004) = 0,9963768$, а величина дополнительных масс $M1_d$ = 209,12 кг ($m1_d[1]$ = 75 кг, $m1_d[22]$ = 44,12 кг, $m1_d[23]$ = 90кг). Так как $M2_d < M1_d$, то выбранное значение δ принимается за правую границу. Итак, δл = 0,004.

4. Принимаем величину δ в середине отрезка поиска $\delta = (0,0005 + 0,004)/2 = 0,00225$. Решаем задачу о повышении первой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$ до значения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = (1,1 + 0,00225)80,2 = 88,4\,\text{с}^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d$ = 169,40 кг ($m2_d[5]$ = 8,4 кг, $m2_d[6]$ = 35 кг, $m2_d[16]$ = 42 кг, $m2_d[17]$ = 42 кг, $m2_d[18]$ = 42 кг). Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80,2 \cdot 1,1 = 88,22\,\text{с}^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1,1/(1,1 + 0,00225) = 0,9979587$, а величина дополнительных масс – $M1_d$ = 176,24 кг ($m1_d[1]$ = 75 кг, $m1_d[22]$ = 11,24 кг, $m1_d[23]$ = 90 кг). Разность абсолютных величин $|M1_d - M2_d|$ составляет (|176,2365 – 169,4027)/176,2365 × × 100 = 3,88 %. Если признать эту разность недостаточно малой, то процесс поиска δ должен быть продолжен. Так как $M1_d > M2_d$, принимаем δ = 0,00225 за правую границу суженного интервала поиска δп = 0,00225. Левая граница интервала поиска остается прежней: δл = 0,0005. Принимаем величину δ в середине нового отрезка поиска $\delta = (0,0005 + 0,00225)/2 = 0,001375$. Решаем задачу о повышении первой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$ до значения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = (1,1 + 0,001375)80,2 \times 80,2 = 88,33\,\text{с}^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d = 167,88$ кг ($m2_d[5]$ = 6,88 кг, $m2_d[6]$ = 35 кг, $m2_d[16]$ = 42 кг, $m2_d[17]$ = 42 кг, $m2_d[18]$ = 42 кг). Затем с учетом снятых масс понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80,2 \cdot 1,1 = 88,22\,\text{с}^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1$ = = 1,1/(1,1 + 0001375) = 0,9987515, а величина дополнительных масс – $M1_d$ = 143,31 кг ($m1_d[1] = 53,31$ кг, $m1_d[23] = 90$ кг). Так как $M1_d < M2_d$, принимаем δ = 0,001375 за левую границу суженного интервала поиска $\delta л = 0,001375$. Правая граница интервала поиска остается прежней: $\delta п = 0,00225$. Принимаем величину δ в середине нового отрезка поиска $\delta = (0,001375 + 0,00225)/2 = 0,001813$. Решаем задачу о повышении первой собственной частоты исходной системы $\omega[1] = 80,20\,\text{с}^{-1}$ до значения $\omega_{02} = (\alpha_\omega 2 + \delta)\omega[1] = (1,1 + 0,001813)80,2 = 88,37\,\text{с}^{-1}$. При этом величина снятых масс $M2_d = 168,64$ кг ($m2_d[5] = 7,64$ кг, $m2_d[6] = 35$ кг, $m2_d[16] = 42$ кг, $m2_d[17] = 42$ кг, $m2_d[18] = 42$ кг). Затем, с учетом снятых масс, понижаем частоту до начального повышения $\omega_{02} = \alpha_\omega 2 \cdot \omega[1] = 80,2 \cdot 1,1 = 88,22\,\text{с}^{-1}$. При этом $\alpha_\omega 1 = 1,1/(1,1 + 0,001813) = 0,99835453$, а величина дополнительных масс $M1_d$ = 167,82 кг ($m1_d[1] = 75$ кг, $m1_d[22] = 2,82$ кг, $m1_d[23] = 90$ кг). Разность абсолютных величин $|M1_d - M2_d|$ составляет всего $(|167,82 - 168,64|/167,82) \times \times 100 = 0,49\%$, что позволяет считать в данном примере задачу решенной. За величину перемещенных масс можно принять среднее значение между $M1_d$ и $M2_d$ – (167,82 + 168,64)/2 = 168,23 кг.

Пример подтвердил, что увеличение ограничений $dm1_d$ и $dm2_d$ привело к снижению величины перемещаемой массы со 176,9 до 168,23 кг.

Таким образом, в статье предложен метод и алгоритм повышения первой частоты собственных колебаний упругой системы до заданного значения, не противоречащего ограничениям задачи, путем оптимального изменения только расположения внешней массы на системе. При этом суммарная величина внешних масс сохраняется, а величина перемещаемой по системе массы при действующих ограничениях минимальна. Метод основан на использовании предложенных в работах [1, 2, 3] методах изменения первой собственной частоты путем оптимизации величин и мест расположения дополнительных или снимаемых масс.

Библиографический список

1. *Ляхович, Л.С.* Оптимизация изменений нагрузки при ограничениях на величину частоты собственных колебаний / Л.С. Ляхович, Н.А. Круль // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2001. – № 1. – С. 8–9.
2. *Ляхович, Л.С.* Оптимизация изменений нагрузки при заданном значении частот собственных колебаний для случаев реализации в виде равенств ограничений на некоторые величины дополнительных или снимаемых масс / Л.С. Ляхович // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2005. – № 1. – С. 84–95.
3. *Ляхович, Л.С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений: монография / Л.С. Ляхович. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. – 372 с.
4. *Ляхович, Л.С.* Варианты постановки задач оптимизации, роль оптимальных решений в реальном проектировании: сб. статей / Л.С. Ляхович // Строительная механика и строительные конструкции. – М. : Скад софт, 2013. – С. 273–301.

References

1. *Lyakhovich L.S., Krul' N.A.* Optimizatsiya izmeneniy nagruzki pri ogranicheniyakh na velichinu chastoti sobstvennikh kolebanii [Optimization of load change at its eigen-frequency quantity restriction]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2001. No. 1. Pp. 8–9. (rus)
2. *Lyakhovich L.S.* Optimizatsiya izmenenii nagruzki pri zadannom znachenii chastot sobstvennikh kolebanii dlya sluchaev realizatsii v vide ravenstv ogranichenii na nekotorie velichini dopolnitelnikh ili snimaemikh mass [Optimization of load change at preset eigen frequency for restrictions to certain values of additional or removed loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 2005. No. 1. Pp. 84–95. (rus)
3. *Lyakhovich L.S.* Osobiye svoyistva optimal'nikh sistem i osnovniye napravleniya ich realizatsii v metodakh rasscheta sooruzhenii, monografiya. [Special properties of optimum systems structural engineering, monograph]. Tomsk : Tomsk State University of Architecture and Building, 2009. 372 p. (rus)
4. *Lyakhovich L.S.* Varianty postanovki zadach optimizatsii, rol' optimal'nykh reshenii v real'nom proektirovanii [Variants of optimization task setting, the role of optimal solutions in real designing]. Stroitel'naya mekhanika i stroitel'nye konstruktsii. Moscow : SKAD SOFT Publ., 2013. Pp. 273–301. (rus)

УДК 539.3/.6

МАКСАК ВЛАДИСЛАВ ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
mksak@mail.ru
СОЛОДКОВА ДАРЬЯ ИГОРЕВНА, студентка,
mksak@mail.ru
НЕФЕДОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, студент,
mksak@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОГО СТЕРЖНЯ ВНЕЦЕНТРЕННОМУ ДЕЙСТВИЮ НАГРУЗКИ

Рассмотрена статически неопределимая задача. Определены зависимости опорных реакций, внутренних силовых факторов от места приложения внецентренной силы. Определены условия смены знака внутренних изгибающих моментов. Выявлен факт изменения координат нейтральной линии и ядра сечения в зависимости от координаты приложения внецентренной силы вдоль оси стержня, и приведены аналитические зависимости. Даны расчетные формулы для определения нормальных напряжений в любом сечении.

Ключевые слова: статически неопределимый стержень; внецентренное действие нагрузки; внутренние силовые факторы; нейтральная линия; ядро сечения; нормальные напряжения.

VLADISLAV I. MAKSAK, Dsc, Professor,
mksak@mail.ru
DAR'Ya I. SOLODKOVA, Student,
mksak@mail.ru
ANDREI A. NEFEDOV, Student,
mksak@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

STATICALLY UNDETERMINABLE BAR RESISTANCE UNDER ECCENTRIC LOAD

The paper focuses on the problem of a statically undeterminable bar resistance. Dependencies between support reactions, internal forces and the point of eccentric load application are detected in this paper. Coordinate variation of the neutral axis and the core of section was detected depending on the eccentric load applied along the bar axis; analytic dependence are given. Theoretical formulas are calculated for normal stresses in any section.

Keywords*:* statically undeterminable bar; eccentric load; internal force; neutral axis; core of section; normal stress.

Впервые задачу совместного действия изгиба с растяжением в 1834 г. решил французский ученый-механик Сен-Венан (1797–1886), а задачу вне-

центренного сжатия бруса – в 1854 г. французский ученый и специалист в области строительной механики Ж.А. Бресс (1822–1883) [1].

Внецентренное действие нагрузки является одним из разделов сложного сопротивления в дисциплине «Сопротивление материалов», изучаемых студентами при обучении техническим специальностям [1, 2, 3]. При этом обычно рассматривается схема нагружения, показанная на рис. 1.

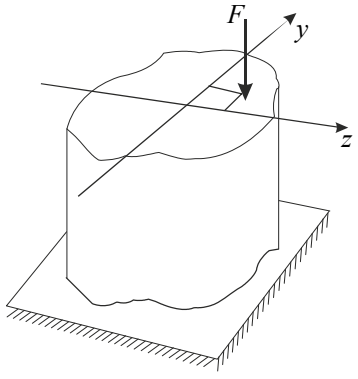


Рис. 1. Схема внецентренного нагружения стержня сжимающей силой

Такому нагружению подвергаются стержни, брусья колонны и другие элементы конструкций [4]. Внецентренное действие нагрузки рассматривалось и в работах [5, 6, 7].

В предлагаемой работе рассматривается статически неопределимая система (рис. 2) в виде внецентренно нагруженной железобетонной колонны.

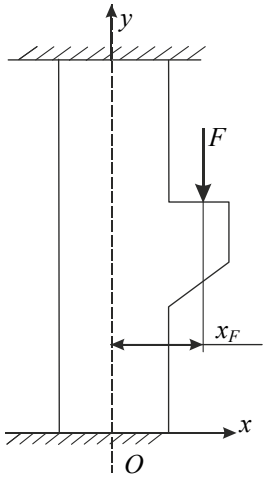


Рис. 2. Внецентренное нагружение колонны

Плоскость действия изгибающего момента лежит в плоскости *XOY*, т. е. совпадает с главной осью инерции поперечного сечения колонны. По-

перечное сечение колонны принято прямоугольным. Расчетная схема представлена на рис. 3.

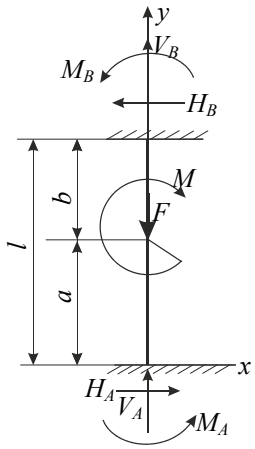


Рис. 3. Расчетная схема

На основании принципа суперпозиций действие осевой силы F и изгибающего момента $M = F \cdot x_F$ рассматривается раздельно. Первым рассматривается действие изгибающего момента M.

На рис. 4 представлены схемы заданной, основной и эквивалентной систем.

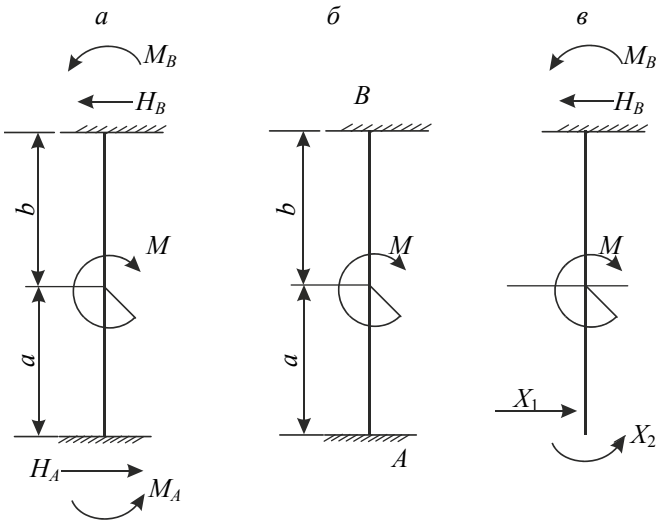


Рис. 4. Заданная схема (*а*), основная система (*б*), эквивалентная система (*в*)

Задача является дважды статически неопределимой с лишними неизвестными X_1 и X_2.

При раскрытии статической неопределимости используется метод сил [8, 9]. При этом канонические уравнения запишутся в виде

$$\begin{aligned} \delta_{1F} + \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 = 0; \\ \delta_{2F} + \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 = 0. \end{aligned} \qquad (1)$$

Для определения значений δ_{1F}, δ_{2F}, δ_{11}, $\delta_{12} = \delta_{21}$, δ_{22} используется способ Верещагина. Эпюры моментов от внешней нагрузки M_u, единичных нагрузок для основной системы представлены на рис. 5.

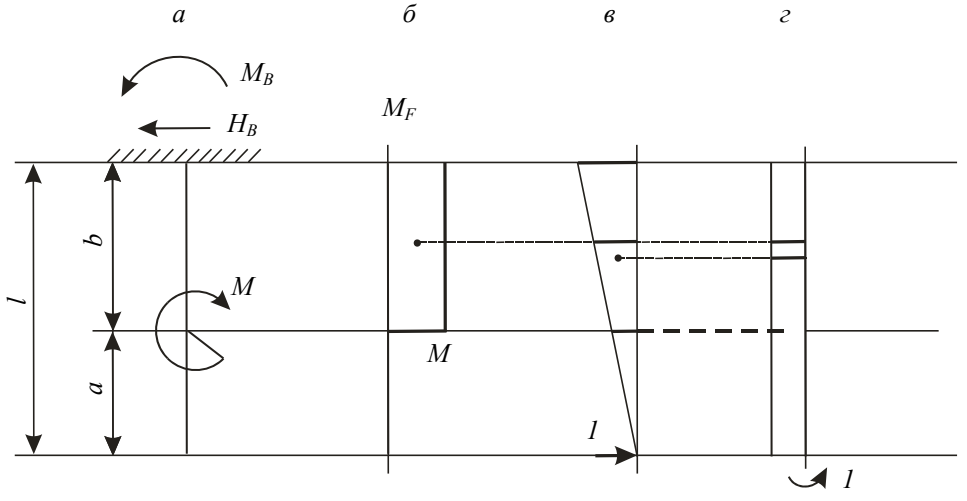


Рис. 5. Основная система (*а*), эпюра моментов от внешнего момента M (*б*), эпюра моментов от единичной силы по направлению X_1 (*в*), эпюра моментов от единичного момента X_2 (*г*)

Перемножения эпюр дают следующие значения:

$$\delta_{1F} = -\frac{Mb}{EJ_z}\left(a + \frac{b}{2}\right);\ \delta_{2F} = -\frac{Mb}{EJ_z};\ \delta_{11} = \frac{l^3}{3EJ_z};\ \delta_{12} = \delta_{21} = \frac{l^2}{2EJ_z};\ \delta_{22} = \frac{l}{EJ_z}.$$

Подстановка полученных значений в систему уравнений (1) и ее решение приводят к определению неизвестных X_1 и X_2:

$$X_1 = \frac{6Mab}{l^3}; \qquad X_2 = \frac{Mb}{l^2}(l - 3a). \qquad (2)$$

Здесь $X_1 = H_A$ и $X_2 = M_A$.

Значения M_B и H_B определяются из условий равновесия

$$\begin{aligned} H_B = X_1 = \frac{6Mab}{l^3}, \\ M_B = \frac{Ma}{l}\left(\frac{3a}{l} - 2\right). \end{aligned} \qquad (3)$$

На рис. 6 в относительных величинах представлено изменение реактивной силы $H_A = X_1$ в зависимости от координаты a расположения сосредоточенного внешнего изгибающего момента M. Точно так же изменяется и реактивная сила H_B.

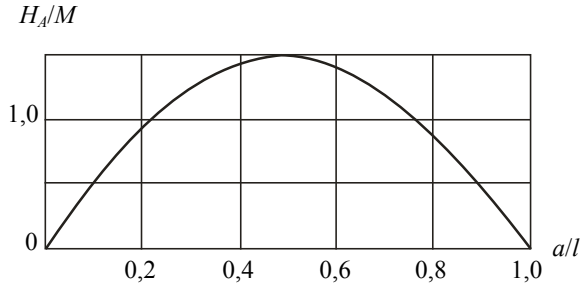


Рис. 6. Зависимость реактивной силы H_A от координаты a расположения внешнего изгибающего момента M

На рис. 7 в относительных величинах представлено изменение реактивных моментов $M_A = X_2$ (сплошная линия) и M_B (пунктирная линия) в зависимости от координаты a расположения момента M, как и на рис. 6.

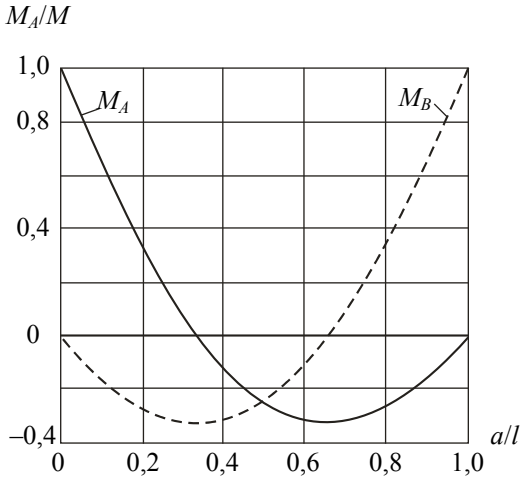


Рис. 7. Зависимость реактивных моментов M_A и M_B от координаты a расположения внешнего изгибающего момента M

Расчеты на прочность требуют определения внутренних силовых факторов. Для рассматриваемой схемы (рис. 8, *а*) имеется два силовых участка. На первом участке $0 \le y_1 \le a$

$$M_{y1} = M_A + V_A \cdot y_1 = \frac{Mb}{l^2}\left(l - 3a\right) + \frac{6Mab}{l^3} y_1 . \qquad (4)$$

При $y_1 = 0$

$$\frac{M_{y1}}{M} = \frac{M_A}{M} = \frac{b\left(l - 3a\right)}{l^2} . \qquad (5)$$

При $y_1 = a$

$$\frac{M_{y1}}{M} = \frac{M_{1C}}{M} = \frac{b(l-3a)}{l^2} + \frac{6a^2b}{l^3}. \qquad (6)$$

На втором участке $a \le y_2 \le l$

$$M_{y2} = \frac{Mb}{l^2}(l-3a) + \frac{6Mab}{l^3}y_2 - M. \qquad (7)$$

При $y_2 = a$

$$\frac{M_{y2}}{M} = \frac{M_{2C}}{M} = \frac{b(l-3a)}{l^2} + \frac{6a^2b}{l^3} - 1. \qquad (8)$$

При $y_2 = l$

$$\frac{M_{y2}}{M} = \frac{M_B}{M} = \frac{a}{l}\left(2 - \frac{3a}{l}\right). \qquad (9)$$

Здесь следует отметить, что формула (9) отличается от формулы (3) только сменой знака на противоположный, т. к. знак формулы (3) связан с уравнением равновесия (статики), а знак формулы (9) определяется правилами знаков, принятыми в дисциплине «Сопротивление материалов» [8, с. 34].

Анализ внутренних силовых факторов показывает, что в зависимости от расположения внешнего момента имеют место пять видов эпюр внутренних моментов, которые схематически показаны на рис. 8, *б*, *в*, *г*, *д*, *е*. Эпюры построены на растянутых волокнах и позволяют представить изогнутую ось стержня (рис. 8, *ж*).

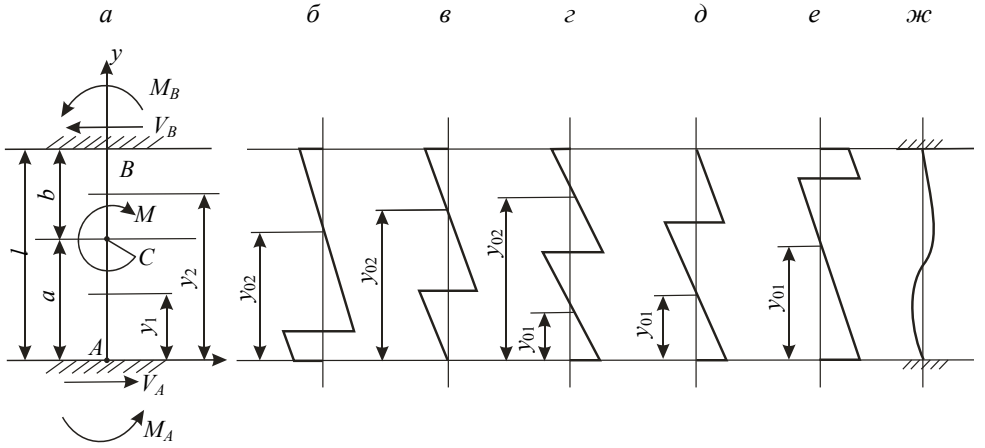


Рис. 8. Схема нагружения (*а*) и виды эпюр внутренних моментов в зависимости от значения *а* расположения внешнего изгибающего момента *M*:
б – $0 < a < 0{,}3\ldots l$; *в* – $a = 0{,}3\ldots l$; *г* – $0{,}3\ldots l < a < 0{,}6\ldots l$; *д* – $a = 0{,}6\ldots l$; *е* – $0{,}6\ldots l < a < 1l$; *ж* – схема изогнутой оси стержня для эпюры моментов *г*

На рис. 9 представлены эпюры моментов $M(a)/M$ для различных значений a/l. Линией *1* показаны максимальные значения $M(a)/M$ с нижней стороны сечения C, где приложен момент M (рис. 8, *а*), а линией *2* – с верхней. По линии абсцисс $M(a)/M$ с ординатой $a/l = 0$ отложены значения M_A, по линии с ординатой $a/l = 1$ – значения M_B. Расстояние между линиями *1* и *2* по направлению оси абсцисс всегда равно моменту M в относительной величине.

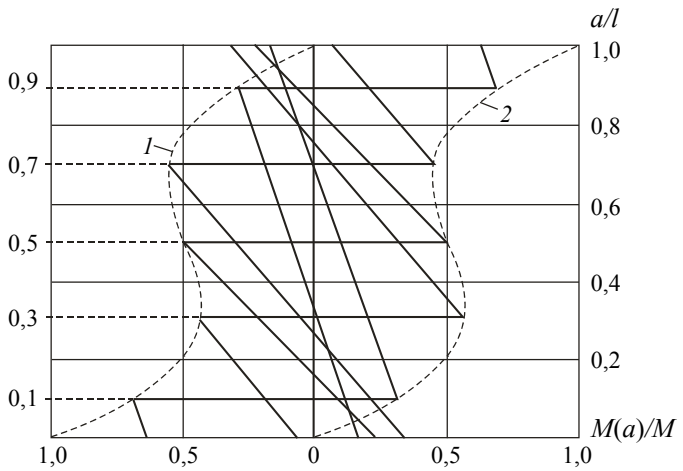


Рис. 9. Эпюры $M(a)/M$ для различных значений a/l: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9

Решение статически неопределимой системы при действии продольной силы F (см. рис. 3) известно [10, с. 43, 44]. На рис. 10 представлены схема нагружения и эпюры внутренних силовых факторов N.

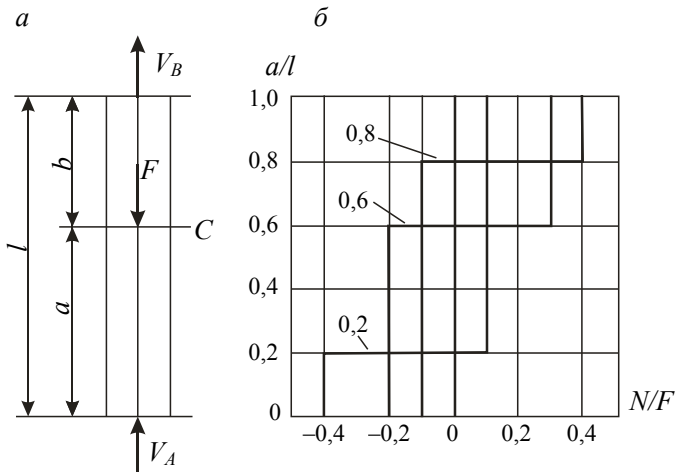


Рис. 10. Схема нагружения продольной силой F (*а*), эпюры внутренних продольных сил N для a/l: 0,2; 0,6; 0,8 (*б*)

Решение данной статически неопределимой системы приводит к определению опорных реакций

$$V_A = \frac{F \cdot b}{l};\ V_B = \frac{F \cdot a}{l}. \qquad (10)$$

Ниже сечения *в*, где приложена сила F, внутренние усилия являются сжимающими, т. е. отрицательными, а выше сечения *в* – растягивающими, т. е. положительными.

В отличие от статически определимой системы с внецентренно действующей нагрузкой [8], в статически неопределимой системе в зависимости от места приложения силы F в стержне имеются участки с противоположными знаками внутренних моментов (рис. 8), и это необходимо учитывать в расчетах на прочность.

На рис. 11 представлены схемы направлений действия внутренних усилий N, изгибающего момента M_y и соответствующие им эпюры нормальных напряжений σ для различных участков стержня, имеющих различные знаки внутренних моментов.

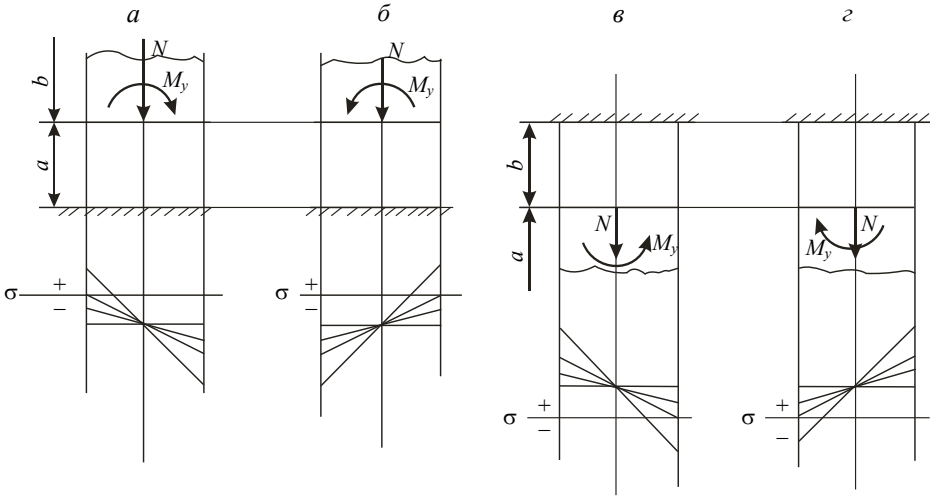


Рис. 11. Схемы направления внутренних усилий N и M_y и соответствующие им схемы нормальных напряжений σ для различных участков стержня (см. рис. 8)

В таблице представлено, какие участки стержня (рис. 8, *б*, *в*, *г*, *д*, *е*) соответствуют схемам усилий N и M_y напряжений σ (рис. 11).

Диапазоны участков внутренних изгибающих моментов M_y, соответствующих схемам действия усилий N и M_y для участков *a* и *b* стержня

Схемы	Диапазоны участков для схем				
	б	*в*	*г*	*д*	*е*
а	$0 \le y_1 \le a$	$0 \le y_1 \le a$	$y_{01} \le y_1 \le a$	$y_{01} \le y_1 \le a$	$y_{01} \le y_1 \le a$
б	–	–	$0 \le y_1 \le y_{01}$	$0 \le y_1 \le y_{01}$	$0 \le y_1 \le y_{01}$
в	$y_{02} \le y_2 \le l$	$y_{02} \le y_2 \le l$	$y_{02} \le y_2 \le l$	–	–
г	$a \le y_2 \le y_{02}$	$a \le y_2 \le y_{02}$	$a \le y_2 \le y_{02}$	$a \le y_2 \le l$	$a \le y_2 \le l$

Координаты y_{01} и y_{02} сечений, в которых внутренний изгибающий момент равен нулю, можно определить из формул (4) и (7).

Так, для участка *a*

$$M_{y1} = 0 = \frac{Mb}{l^2}(l - 3a) + \frac{6Mab}{l^3} y_{01},$$

$$y_{01} = \frac{(3a - l)l}{6a}.$$

К примеру: при $a = 0{,}3...l = \frac{l}{3}$ $y_{01} = 0$, что соответствует схеме *в* (рис. 8).

Для участка *b*

$$M_{y2} = 0 = \frac{Mb}{l^2}(l - 3a) + \frac{6Mab}{l^3} y_{02} - M,$$

при $a = 0{,}66...l = \frac{2}{3}l$, $y_{02} = \frac{4l^2 - 3al}{6(l - a)}$

$y = l$, что соответствует схеме *в* (рис. 8).

Возникающие при внецентренном действии силы *F* нормальные напряжения σ в некоторой точке *K* поперечного сечения (рис. 12) определяются по формулам:

для участка *a*

$$\sigma_K = -\frac{N}{A} \pm \frac{M_y x_K}{J_z}. \qquad (11)$$

Знак (–) для схемы *а*; знак (+) для схемы *б* (рис. 11).

Для участка *б*

$$\sigma_K = -\frac{N}{A} \pm \frac{M_y x_K}{J_z}. \qquad (12)$$

Знак (–) для схемы *в*; знак (+) для схемы *г* (рис. 11).

Здесь *A* – площадь поперечного сечения стержня.

Опасными являются крайние точки сечения *C* (где приложена внецентренная сила *F*) с координатами $x_K = \pm h/2$.

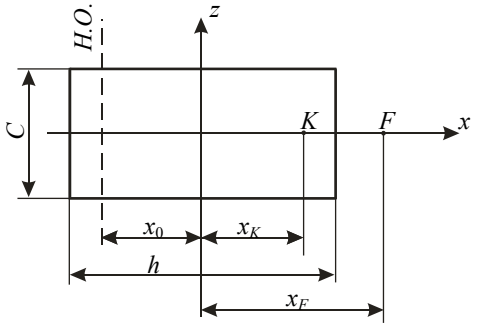


Рис. 12. Поперечное сечение стержня с координатами x_K исследуемой точки *K* и x_F точки приложения силы *F*

Судя по рис. 9, наиболее опасным будет сечение *C* либо со стороны стержня *a*, либо со стороны стержня *b*. Так, для первого случая этому соответствуют схема *a* (рис. 11) и формула (11), которые с учетом (6) и (10) примут вид

$$\sigma_K = -\frac{Fb}{lA} - \left[\frac{Fx_F b}{l^2}(l-3a) + \frac{Fx_F \cdot 6a^2 b}{l^3}\right]\frac{x_K}{J_z} =$$

$$= -\frac{F(l-a)}{Al}\left[1 + \frac{\left(l^2 - 3al + 6a^2\right)}{l^2}\frac{x_F x_K}{l_z^2}\right].$$

В точках, лежащих на нейтральной оси, имеющей координату x_0, напряжения $\sigma = 0$.

При этом уравнение нейтральной оси имеет вид

$$1 + \frac{\left(l^2 - 3al + 6a^2\right)x_F x_0}{l^2 i_z^2}. \qquad (13)$$

Это уравнение прямой линии, параллельной оси *z* (рис. 12).

По аналогии с ядром сечения [8] из (13) можно определить координату x_F точки приложения силы *F*, при которой напряжения σ по всему сечению будут одного знака, а нейтральная ось будет касаться одной стороны сечения и иметь координату x_0:

$$x_F = -\frac{l^2 i_z^2}{\left(l^2 - 3al + 6a^2\right)x_0}.$$

Для сечения (рис. 12) при $x_0 = -h/2$ это будет

$$x_F = \frac{l^2 h}{\left(l^2 - 3al + 6a^2\right)}.$$

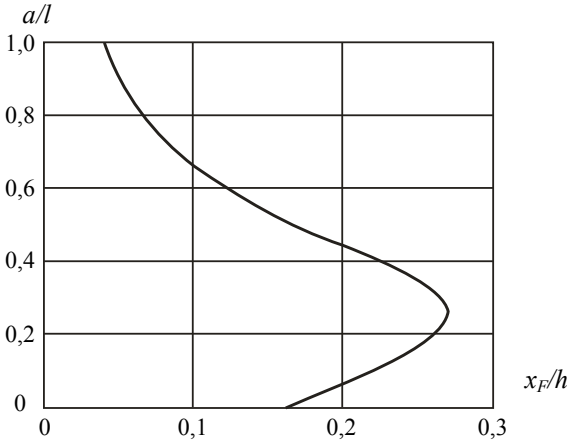


Рис. 13. Зависимость координаты x_F контура ядра сечения от координаты *a* расположения внецентренной силы *F*

На рис. 13 в относительных величинах для участка *a* представлена зависимость координаты x_F от координаты *a* расположения внецентренной силы *F*.

С точки зрения большей опасности растягивающих напряжений более опасным будет сечение *C* со стороны участка *b*. Это формула (12) для схемы *г* (рис. 11). Формула (8) по отношению к (6) для построения эпюры моментов меняет знак. Однако для определения напряжений момент в (8) следует брать по абсолютной величине. С учетом этого, а также (10) формула (12) примет вид

$$\sigma = \frac{Fa}{lA} - \left[\frac{Fx_F b(l-3a)}{l^2} + \frac{Fx_F 6a^2 b}{l^3} - Fx_F \right] \frac{x_K}{J_z} =$$

$$= \frac{Fa}{lA} \left[1 - \left(\frac{9al + 6a^2 - 4l^2}{l^2} \right) \frac{x_F x_K}{i_z^2} \right].$$

О ядре сечения есть смысл говорить в том случае, когда растягивающие напряжения от изгиба частично компенсируются сжимающей силой. В случае же совместного действия изгиба и растяжения растягивающие напряжения суммируются и всегда будут больше сжимающих (рис. 11, *в*, *г*).

Выводы

В отличие от статически определимых систем (СОС) при внецентренном действии нагрузки (ВДН), в статически неопределимых системах (СНС) происходит следующее:

1. Эпюры изгибающего момента вдоль оси переменны и меняют свой знак на противоположный.

2. При защемлении обоих концов стержня на некоторых его участках возникают растягивающие напряжения от продольной силы *F*. С ними суммируются растягивающие напряжения от изгиба. Этот случай для хрупких материалов является наиболее опасным.

3. Выполненные анализ и расчет являются пригодными для напряженного железобетона.

4. Выполненные анализ и расчет относятся не только к колонне, но и к неразрезным колоннам, балкам и плитам перекрытия.

5. Выполнен анализ изменения опорных реакций внутренних силовых факторов и распределения нормальных напряжений в зависимости от координаты сечения, где приложена внецентренная сила.

6. Положение нейтральной оси меняется не только при изменении момента, за счет изменения плеча силы *F*, но и от положения сечения, в котором приложена внецентренная нагрузка.

7. В отличие от СОС, в СНС координаты ядра сечения являются переменными вдоль оси стержня.

Библиографический список

1. *Максак, В.И.* Методика преподавания курса сопротивления материалов / В.И. Максак. – Красноярск : КГТУ, 1999. – 140 с.
2. *Kuprijanov, N.A.* Strength of Materials / N.A. Kuprijanov, N.V. Demjanenko. – Tomsk : TPU, 2010. – 127 p.
3. *Справочник металлиста* / под ред. Н.С. Ачеркана. – М. : Машгиз, 1962. – Т. 2. – С. 131. – 974 с.

4. *Tetmajer, L.V.* Elastizitäts- und Festigkeitslehre / L.V. Tetmajer // Leipzig und Wien. Franz Deuticke, 1904. S. 162–173; 349–380; 565 S.
5. *Максак, В.И.* Сближение тел с плоским кольцевым нелинейно-деформируемым упругим контактом при внецентренном действии сжимающей нагрузки / В.И. Максак, Т.В. Максак // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 3. – С. 150–155.
6. *Максак, В.И.* Раскрытие стыка в нелинейно-деформируемом упругом контакте при внецентренном действии сжимающей нагрузки / В.И. Максак, Т.В. Максак // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4. – С. 158–165.
7. *Maksak, V.I.* Calculation of Contact Durability in Rotary Mechanism on the Example of Timber-loader / V.I. Maksak, T.V. Maksak // Scientific Problems of Machines Operation and Maintaince. Polish Academy of Sciences. – 4(160). Vol. 44, 2009. – P. 71–79.
8. *Александров, А.В.* Сопротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М. : Высшая школа, 2009. – 560 с.
9. *Самсонова, Р.И.* Расчет статически неопределимых систем методом сил / Р.И. Самсонова, Б.А. Тухфатуллин. – Томск : ТГАСУ, 1912. – 34 с.
10. *Михайлов, А.М.* Сопротивление материалов / А.М. Михайлов. – М. : Академия, 2009. – 448 с.

REFERENCES

1. *Maksak V.I.* Metodika prepodavaniya kursa soprotivleniya materialov [Methodology of the course on strength of materials]. Krasnoyarsk : Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 1999. 140 p. (rus)
2. *Kuprijanov N.A., Demjanenko N.V.* Strength of materials. Tomsk : TPU Publishing House, 2010. 127 p. (rus)
3. *Acherkan N.S.* Spravochnik metallista [Metalworker handbook]. Moscow : Mashgiz Publ., 1962. V. 2. P. 131. 974 p. (rus)
4. *Tetmajer L.V.* Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Leipzig und Wien. Franz Deuticke, 1904. Pp. 162–173; 349–380; 565 p.
5. *Maksak V.I., Maksak T.V.* Sblizhenie tel s ploskim kol'tsevym nelineino-deformiruemym uprugim kontaktom pri vnetsentrennom deistvii szhimayushchei nagruzki [Body convergence with flat ring nonlinear deformable elastic contact]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 150–155. (rus)
6. *Maksak V.I.* Raskrytie styka v nelineino-deformiruemom uprugom kontakte pri vnetsentrennom deistvii szhimayushchei nagruzki [Nonlinear elastic interfacial contact opening under eccentric compressive loading]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 4. Pp. 158–165. (rus)
7. *Maksak V.I., Maksak T.V.* Calculation of contact durability in rotary mechanism on the example of timber-loader. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*. *Polish Academy of Sciences*. No. 4(160). V. 44. 2009. Pp. 71–79.
8. *Aleksandrov, A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P.* Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow : Vysshaya Shkola Publishers, 2009. 560 p. (rus)
9. *Samsonova R.I., Tukhfatullin B.A.* Raschet staticheski neopredelimykh sistem metodom sil. Metodicheskie ukazaniya [Statically undeterminable system design using the force method]. Tomsk : Tomsk State University of Architecture and Building Publ., 1912. 34 p. (rus)
10. *Mikhailov A.M.* Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow : ITs Akademiya [Publishing Center Academia], 2009. 448 p. (rus)

УДК 624.04:519.2

СЕБЕШЕВ ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ, канд. техн. наук, профессор,
sebeshev@sibstrin.ru
ГЕРБЕР ЮРИЙ АНДРЕЕВИЧ, инженер,
jura.gerber@rambler.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГАСИТЕЛЯМИ КОЛЕБАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

В задаче определения надежности по условию усталостной прочности конструкций, защищаемых от вибрации с помощью динамических гасителей колебаний, оценено влияние основных расчетных параметров линейно деформируемых систем с конечным числом степеней свободы масс. На основании анализа чувствительности вероятности отказа к изменчивости характеристик защищаемой конструкции, гасителя и динамической нагрузки выявлены наиболее значимые из них – амплитуда и частота нагрузки, масса и жесткость упругого элемента гасителя. Представлены количественные результаты расчетов надежности модельной балочной системы с двумя степенями свободы масс, подтверждающие сделанные качественные выводы.

Полученные данные позволяют формулировать требования к точности реализации проектных параметров гасителей для обеспечения необходимой надежности.

Ключевые слова: надежность; вероятность отказа; система с конечным числом степеней свободы; гармоническая нагрузка; гаситель колебаний; резонанс; коэффициенты динамичности.

VLADIMIR G. SEBESHEV, PhD, Professor,
sebeshev@sibstrin.ru
YURIY A. GERBER, Engineer,
jura.gerber@rambler.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia

STRUCTURAL ANALYSIS OF RANDOM PARAMETERS UNDER HARMONIC LOADS

According to the reliability problem definition for damper-protected structures from vibrations, the influence of basic structural parameters on deformable systems and the finite number of degree of freedom was evaluated in this paper. The analysis of failure probability sensitivity to variable characteristics of protected structure, the damper and dynamic load were established, i.e. the load amplitude and frequency, mass and stiffness of the damper elastic element. Quantitative results of reliability design analysis of the beam system with two degrees of freedom are presented herein that confirm the conclusion drawn by the authors. The data analysis allows formulation of requirements for the accuracy of project parameters implementation to provide the appropriate reliability.

Keywords: reliability; failure rate; finite number of degree of freedom; harmonic load; vibration damper; resonance; dynamic factor.

Инженерные системы, в том числе строительные конструкции и сооружения, могут испытывать различные динамические воздействия техногенного и природного характера, в частности вибрационные (гармонического типа) – от установленных машин, установок, технологического оборудования, а также циклические аэродинамические и гидравлические волновые нагрузки.

Улучшение динамического состояния объекта возможно за счет применения различных приемов и технических решений. Одним из путей является оптимизация характеристик рассматриваемой системы – в этом направлении академиком Л.С. Ляховичем разработаны методы синтеза линейно деформируемых систем с требуемыми динамическими свойствами за счет отыскания выгоднейшего расположения масс и упругих связей [1]. Получили развитие также теория и практика снижения вибрации за счет специальных устройств, встраиваемых в защищаемый объект, – гасителей колебаний [2–4], являющихся по сути регуляторами динамического напряженно-деформированного состояния системы. Одним из видов таких устройств являются динамические гасители, представляющие собой сочетание сравнительно небольшой дополнительной массы, прикрепляемой к защищаемому объекту деформируемой связью. Гасители колебаний, в том числе динамические, являются эффективными регуляторами – при точном обеспечении их расчетных характеристик при определенных условиях теоретически возможно практически полностью исключить вибрации конструкции, сооружения. Но реальные объекты и гасители колебаний, а также динамические воздействия обладают стохастическими свойствами, вследствие чего полностью предотвратить вибрации невозможно.

В результате случайных погрешностей реализации параметров гасителя и частоты вибрационной нагрузки возможно попадание системы в зону резонанса, чему может способствовать также изменение резонансной частоты вследствие вероятностных отклонений от проектных значений геометрических, жесткостных и инерционных характеристик защищаемого объекта. При неконтролируемых погрешностях расчетных параметров конструкции, нагрузки и гасителя влияние последнего может даже ухудшать динамическое состояние системы по сравнению с незащищенной конструкцией [5] и снижать ее надежность.

Регулирование и оптимизация, направленные, как правило, на выявление ресурсов несущей способности сооружений и конструкций и экономию материалов, приводят к ухудшению показателей надежности, учет которых в расчетах и проектировании становится актуальным, что нашло отражение как в теории сооружений [6], так и в нормативных требованиях [7]: необходимость обеспечения установленных уровней надежности при проектировании строительных конструкций предписывается в Eurocodes.

Поскольку принципиальным в рассматриваемой задаче расчета надежности гармонически нагруженной системы является наличие гасителя – регулятора динамического состояния объекта, то возникает потребность в оценке влияния отклонений характеристик регулятора, а также других параметров системы на ее надежность по заданному критерию безотказности. Вероятностные харак-

теристики конструкции, гасителя и нагрузки являются параметрами проектирования по терминологии [8], по-разному влияющими на параметры состояния системы и в конечном счете на вероятность ее отказа/надежности. Чувствительность показателей надежности к изменчивости различных входных параметров качественно может быть спрогнозирована на основании анализа их свойств. Так, в задаче динамики линейно деформируемой системы амплитуда нагрузки линейно влияет на перемещения, усилия, напряжения. А собственные характеристики геометрии, жесткости и инерционности конструкции и гасителя нелинейно входят в уравнения динамического состояния системы, причем влияние некоторых из них проявляется слабо – например, соотношений жесткостей элементов конструкции (трактуя их как регуляторы состояния, можно убедиться в их слабой эффективности [9]), а другие могут выступать в качестве сильных регуляторов – далее будет показано, что к таковым относятся в первую очередь характеристики гасителя.

Основные задачи работы – на основе сравнительного анализа чувствительности стохастических свойств параметров динамического напряженно-деформированного состояния (усилий, напряжений и др.) линейно деформируемых систем с динамическими гасителями колебаний к изменчивости основных расчетных характеристик конструкции, гасителя и гармонической нагрузки выявить наиболее значимые из них; получить количественные оценки чувствительности для модельной стержневой системы; сформулировать рекомендации по учету вероятностных свойств расчетных параметров при оценке надежности динамически нагруженных сооружений и конструкций, защищаемых от вибраций гасителями рассматриваемого типа.

Для получения расчетных зависимостей, описывающих динамическое состояние стохастической конструкции с гасителем колебаний, рассматривается модель в виде деформируемой системы с невесомыми элементами и сосредоточенными массами, имеющими n степеней свободы, загруженной одиночной сосредоточенной вибрационной нагрузкой, по направлению которой поставлен динамический гаситель колебаний. Фрагмент системы в окрестности места приложения нагрузки показан на рис. 1. Для удобства записи и анализа уравнений перемещению точки защищаемой конструкции по направлению силы $F(t)$ присвоен номер n, а перемещение массы гасителя обозначено как $y_d(t)$. Система может быть любого типа (стержневая, пластинчато-оболочечная, комбинированная, плоская или пространственная); возможен учет инерции поворота неточечных масс; наличие массы m_n необязательно ($m_n \geq 0$).

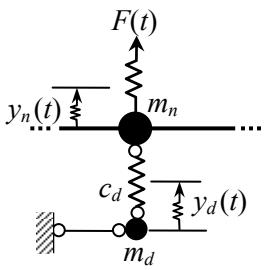


Рис. 1. Расчетная модель деформируемой системы с динамическим гасителем колебаний

Уравнения движения масс системы получаются из общих уравнений динамики линейно деформируемых систем

$$M\,\ddot{y}(t)+C\,\dot{y}(t)+K\,y(t)+R_F\,(t)=0, \tag{1}$$

которые в случае установившихся вынужденных колебаний при сосредоточенной гармонической нагрузке $F(t) = F\sin(\omega_F t + \varphi_0)$ в пренебрежении слабым демпфированием дают уравнения в амплитудах перемещений масс

$$(K-\omega_F^2\cdot m)y=F_0\,, \tag{2}$$

где K – матрица жесткости (единичных реакций) системы с гасителем по направлениям перемещений масс, включая массу m_d:

$$K=\underbrace{\begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{(n+1)\cdot(n+1)}+\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \begin{matrix} c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{matrix} \end{bmatrix}}_{(n+1)\cdot(n+1)};$$

r_s – матрица жесткости защищаемой конструкции размером $(n \cdot n)$; $y = [y_1 \cdot y_2 \ \ldots \ y_n \cdot y_d]^{\mathrm{T}}$ – вектор амплитуд перемещений масс; $m = \mathrm{diag}\,[m_1\ m_2\ \ldots\ m_n\ \ m_d\,]$ – матрица масс; $F_0 = [\,0\ 0\ \ldots\ 0\ \ F\ 0\,]$ – вектор амплитуд вибрационных нагрузок.

Если потребовать равенства нулю перемещений всех масс защищаемой системы ($y_1 = y_2 = \ldots = y_n = 0$), то первые $n - 1$ уравнений (2) превращаются в тождества $0 \equiv 0$, а последние два принимают вид

$$\left.\begin{aligned} -c_d\,y_d &= F, \\ (c_d-m_d\,\omega_F^2)\,y_d &= 0. \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Из второго уравнения (3) при $y_d \neq 0$ получается условие идеального гасителя

$$c_d\,m_d^{-1}=\omega_F^2\,, \tag{4}$$

а из другого уравнения – формула для амплитуды перемещения его массы

$$y_d=-F/c_d=-F/(m_d\omega_F^2)\,, \tag{5}$$

свидетельствующая о движении массы гасителя в противофазе нагрузке $F(t)$, следствием чего является неподвижность защищаемой конструкции.

В реальных сооружениях и конструкциях строгое выполнение условия (4) невозможно из-за случайных отклонений от проектных значений частоты ω_F и параметров гасителя c_d и m_d. При произвольной случайной реализации параметров динамический расчет системы выполняется с использованием полной системы уравнений (2) – решением ее находятся амплитуды перемещений масс y, используемые затем для вычисления динамических компонентов напряженно-деформированного состояния конструкции (усилий, напряжений, перемещений, скоростей и др.) и реакции упругого элемента гасителя:

$$p = \sum_{k=1}^{n} p_k y_k; \quad R_d = c_d(y_n - y_d), \tag{6}$$

где p_k – значение величины p от $y_k = 1$.

В случае двух степеней свободы масс конструкции ($n = 2$) уравнения (2) записываются в виде

$$\begin{bmatrix} r_{11} - m_1\omega_F^2 & r_{12} & 0 \\ r_{21} & r_{22} - m_2\omega_F^2 & -c_d \\ 0 & -c_d & c_d - m_d\omega_F^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Если массу m_1 трактовать как приведенную, с соответствующим групповым перемещением (обобщенной координатой), то решение для $n = 2$ можно распространить на любое число сосредоточенных масс.

Для вычисления надежности по критерию динамической прочности стержневой системы определяются амплитуды напряжений, вычисляемые по найденным динамическим усилиям – изгибающим и крутящим моментам, продольным и поперечным силам. Учитываются также напряжения от статических воздействий. Изменчивость динамических и статических силовых факторов, а также геометрических характеристик сечений элементов конструкции и гасителя предопределяет вероятностный разброс значений напряжений, влияющий на оценку вероятности отказа / надежности системы. Методика расчета надежности системы с гасителем по условию усталостной прочности приведена в работе [10].

Для стержневой системы с элементами, работающими преимущественно на изгиб, основным расчетным силовым фактором является динамический изгибающий момент. В сечении 2 (в месте приложения вибрационной нагрузки), согласно (6), $M_{2,\,dyn} = M_{21}y_1 + M_{22}y_2$ (здесь M_{21} и M_{22} – моменты в сечении 2 от единичных перемещений масс $y_1 = 1$ и $y_2 = 1$ соответственно). Удобно представить $M_{2,\,dyn}$ с использованием безразмерных коэффициентов динамичности:

$$M_{2,dyn} = M_{22}\, y_{2,st} \left(\mu_{y2} + \mu_{y1} \frac{M_{21}}{M_{22}} \frac{y_{1,st}}{y_{2,st}} \right), \tag{8}$$

где $y_{1,\,st}$ и $y_{2,\,st}$ – перемещения масс m_1 и m_2 от условно статического действия амплитуды F динамической нагрузки; μ_{y1} и μ_{y2} – коэффициенты динамичности по перемещениям y_1 и y_2.

Множитель $M_{21}{\cdot}y_{1,\,st}/(\,M_{22}\cdot y_{2,\,st}\,)$ при μ_{y1} в (8) зависит только от глобальных геометрических характеристик расчетной схемы системы (координат узлов и точек расположения масс m_1 и m_2) и отношений жесткостей элементов. При реальных (достаточно малых) относительных отклонениях этих параметров системы от проектных значений указанный множитель может рассматриваться как практически постоянный.

Произведение $M_{22} \cdot y_{2,\,st}$ (общий множитель в правой части (8)) прямо пропорционально амплитуде нагрузки F, а по параметрам геометрии и жесткости системы может считаться слабо вариативным.

Следовательно, стохастическая изменчивость динамического момента $M_{2,\,dyn}$ обусловливается преимущественно вероятностным разбросом значений коэффициентов динамичности μ_{y1} и μ_{y2}, принципиально зависящих от всех статических и динамических параметров системы. Для рассматриваемого случая двух степеней свободы масс защищаемой конструкции имеем следующие выражения динамических коэффициентов:

$$\mu_{y1} = \frac{1 - \dfrac{r_{12}^2}{r_{11} r_{22}}}{-\dfrac{r_{12}^2}{r_{11} r_{22}} - \left[1 - \dfrac{c_d\left(1-\varepsilon_d\right)}{r_{11} k_{md}}\right]\left[1 - \dfrac{c_d}{r_{22}}\left(1-\varepsilon_d\right)\cdot\left(\dfrac{k_m}{k_{md}} + \dfrac{1}{\varepsilon_d}\right)\right]}; \qquad (9)$$

$$\mu_{y2} = \frac{1 - \dfrac{r_{12}^2}{r_{11} r_{22}}}{1 - \dfrac{1}{r_{22}}\left[c_d\left(1-\varepsilon_d\right)\left(\dfrac{k_m}{k_{md}} + \dfrac{1}{\varepsilon_d}\right) + \dfrac{r_{12}^2}{r_{11} - c_d\left(1-\varepsilon_d\right)/k_{md}}\right]}, \qquad (10)$$

где r_{ik} (i, k = 1, 2) – элементы матрицы жесткости r_s защищаемой системы; $k_{md} = m_d/m_1$; $k_m = m_2/m_1$ ($k_m = 0$ в случае отсутствия массы в точке приложения динамической нагрузки); $\varepsilon_d = 1 - m_d\omega_F^2/c_d$ (для идеального гасителя $\varepsilon_d = 0$, при этом $\mu_{y1} = \mu_{y2} = 0$).

Качественный анализ полученных зависимостей показывает, что числители в (9) и (10) могут считаться почти детерминированными, т. к. зависят от отношений жесткостей и длин элементов, имеющих, как отмечено выше, узкие (в сравнении с другими параметрами системы) доверительные интервалы значений. В целом влияние малых случайных отклонений жесткостных и глобальных геометрических характеристик защищаемой конструкции оценивается как второстепенное – оно сказывается на реакциях r_{ik}. Основное значение имеет изменчивость массы m_d и жесткости c_d гасителя, а также частоты нагрузки ω_F, от которых зависит величина $1/\varepsilon_d$ в знаменателях обеих формул. Поскольку в математическом ожидании (для идеального гасителя) $\varepsilon_d = 0$, то малые отклонения ε_d от 0 могут вызывать сильные (в разы) изменения коэффициентов динамичности.

Для получения количественных оценок влияния изменчивости различных расчетных параметров на надежность конструкции рассмотрена модельная задача – балочная система с двумя сосредоточенными массами и динамическим гасителем изгибных колебаний (рис. 2).

Компоненты матрицы жесткости балки при математических ожиданиях размеров $\overline{a}_1 = \overline{a}_2 = l/4$: $r_{11} = r_{22} = 216EI/l^3$; $r_{12} = -(7/9)r_{11}$. Приближенные (без учета возможных малых вариаций величин a_1/l и a_2/l) выражения динамических коэффициентов при $\overline{m}_1 = \overline{m}_2$:

$$\mu_{y1} \approx \frac{32/81}{-\frac{49}{81}-\left[1-\frac{k_{cd}(1-\varepsilon_d)}{216k_{md}}\right]\left[1-\frac{k_{cd}(1-\varepsilon_d)}{216}\left(\frac{1}{k_{md}}+\frac{1}{\varepsilon_d}\right)\right]}; \qquad (11)$$

$$\mu_{y2} \approx \frac{32/81}{1-\frac{1}{216}\left[k_{cd}(1-\varepsilon_d)\left(\frac{1}{k_{md}}+\frac{1}{\varepsilon_d}\right)+\frac{49/81}{1-k_{cd}(1-\varepsilon_d)/(216k_{md})}\right]}, \qquad (12)$$

где $k_{cd} = \dfrac{c_d l^3}{EI} \approx k_{md}\dfrac{m_1 l^3 \omega_F^2}{EI}$.

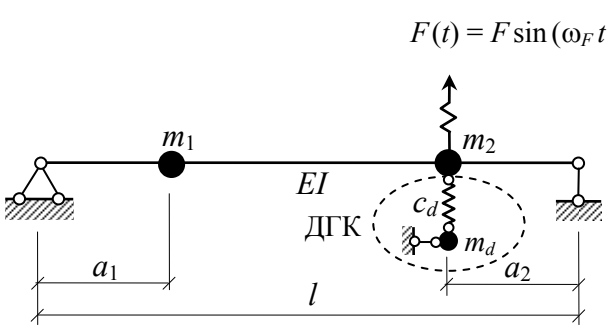


Рис. 2. Схема балочной системы с динамическим гасителем

В выражениях (11) и (12) очевидно радикальное влияние слагаемого $1/\varepsilon_d$ в знаменателях при варьировании ε_d в окрестности 0.

Для расчета надежности N или вероятности отказа $P_s(0) = 1 - N$ по актуальному при длительных вибрационных воздействиях условию усталостной прочности системы (решение характерной задачи приведено в [10]) требуется вычисление динамических и статических составляющих напряжений в потенциально опасных сечениях конструкции. Для рассматриваемой балки (рис. 2) это два расчетных сечения – в местах расположения масс. Возможен также учет требования прочности деформируемого элемента гасителя. Вычисление надежности или вероятности отказа по принятым условиям безотказности осуществляется методом, предложенным А.Р. Ржаницыным [11] для двух сечений (N_1 и N_2 или $P_{s1}(0)$ и $P_{s2}(0)$) и гасителя (N_d или $P_{sd}(0)$), после чего надежность системы находится как

$$N = N_1 N_2 N_d \quad \text{или} \quad N = 1 - P_s(0), \qquad (13)$$

где $P_s(0) = P_{s1}(0) + P_{s2}(0) + P_{sd}(0) - P_{s1}(0)\cdot P_{s2}(0) - P_{s1}(0)\cdot P_{sd}(0) - P_{s2}(0)\cdot P_{sd}(0) + P_{s1}(0)\cdot P_{s2}(0)\cdot P_{sd}(0)$.

Случайные амплитуды динамических напряжений в сечениях 1 и 2 находятся как $\sigma_{j,\,dyn} = M_{j,\,dyn}/W_j = \sum_{k=1}^{2} M_{jk}\, y_{j,st}\, \mu_{yj} / W_j$, $j = 1, 2$ – для каждой из

них вычисляются математическое ожидание (МО) $\overline{\sigma}_{j,dyn} = \overline{M}_{j,dyn} / \overline{W}$ (здесь $\overline{M}_{j,dyn} = \sum_{k=1}^{2} \overline{M}_{jk}\, \overline{y}_{j,st}\, \overline{\mu}_{yj}$; верхняя черта – символ МО соответствующей случайной величины) и стандарт $\hat{\sigma}_{j,dyn}$, определяемый методом статистической линеаризации (МСЛ):

$$\hat{\sigma}_{j,dyn} = \sqrt{\left(\left.\frac{\partial \sigma_{j,dyn}}{\partial M_{j,dyn}}\right|_{\substack{\overline{M}_{j,dyn} \\ \overline{W}_j}} \cdot \hat{M}_{j,dyn} \right)^2 + \left(\left.\frac{\partial \sigma_{j,dyn}}{\partial W_j}\right|_{\substack{\overline{M}_{j,dyn} \\ \overline{W}_j}} \cdot \hat{W}_j \right)^2} = \overline{\sigma}_{j,dyn}\, A_{\sigma j,dyn}, \quad (14)$$

где $A_{\sigma j,dyn}$ – коэффициент вариации амплитуды динамического напряжения:

$$A_{\sigma j,\, dyn} = \sqrt{A^2_{Mj,dyn} + A^2_{Wj}}\ ;$$

$A_{Mj,\ dyn}$ и A_{Wj} – коэффициенты вариации амплитуд динамического момента и момента сопротивления сечения. A_{Wj} заранее известен, а для вычисления $A_{Mj,\ dyn} = \hat{M}_{j,dyn} / \overline{M}_{j,dyn}$ определяется стандарт $\hat{M}_{j,dyn}$ – также методом СЛ:

$$\hat{M}_{j,dyn} = \sqrt{\sum_{k=1}^{2} \left(\overline{M}_{jk} \overline{y}_{k,st} \overline{\mu}_{yk} \right)^2 \left(A^2_{Mjk} + A^2_{yk,st} + A^2_{\mu yk} \right)}. \quad (15)$$

Вычисление коэффициентов вариации единичных моментов A_{Mkj} выполняется достаточно просто, т. к. они зависят только от жесткостных и геометрических параметров схемы балки (EI, l, a_1 и a_2). Коэффициенты вариации $A_{yk,\ st}$ статических перемещений учитывают также стохастическую изменчивость амплитуды нагрузки F, причем при реальных вероятностных свойствах расчетных параметров влияние вариативности нагрузки является преобладающим. С менее значимой поправкой за счет жесткости EI можно принимать $A^2_{yk,st} \approx A^2_F + A^2_{EI}$. Наиболее существенный вклад в описание статистических свойств изгибающего момента вносят коэффициенты $A_{\mu yk}$, зависящие от стандартов коэффициентов динамичности по перемещениям ($A_{\mu yk} = \hat{\mu}_{yk} / \overline{\mu}_{yk}$, $k = 1, 2$). При отыскании $\hat{\mu}_{y1}$ и $\hat{\mu}_{y2}$ методом СЛ учитываются все характеристики расчетной схемы, кроме амплитуды нагрузки:

$$\hat{\mu}_{yj} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_x} \left(\left.\frac{\partial \mu_{yj}}{\partial x_i}\right|_{X=\overline{X}} \cdot \hat{x}_i \right)^2}, \quad j = 1, 2; \quad X = \{ m_1\ m_2\ m_d\ c_d\ \omega_F\ EI\ a_1\ a_2\ l \}. \quad (16)$$

На результаты вычислений по (16) влияют как значения стандартов компонентов вектора входных параметров X или их коэффициентов вариации, так и производные $\partial \mu_{yj} / \partial x_j$, например:

$$\frac{\partial \mu_{y2}}{\partial \omega_F} = \frac{512}{3}\frac{1-\varepsilon_d}{\omega_F}\frac{k_{cd}\left(\frac{1}{k_{md}}+\frac{1}{\varepsilon_d^2}\right)\left[216-\frac{k_{cd}}{k_{md}}(1-\varepsilon_d)^2\right]^2+\frac{392}{3}\frac{k_{cd}}{k_{md}}}{\left\{\left[216-k_{cd}(1-\varepsilon_d)\left(\frac{1}{k_{md}}+\frac{1}{\varepsilon_d}\right)\right]\left[216-k_{cd}(1-\varepsilon_d)\right]-\frac{392}{3}\right\}^2}. \quad (17)$$

При затруднительности получения и громоздкости аналитических выражений возможно их численное определение:

$$\left.\frac{\partial \mu_{yj}}{\partial x_i}\right|_{X=\overline{X}} \approx \frac{\mu_{yj}(\overline{x}_1, \overline{x}_2, ..., \overline{x}_{i-1}, \overline{x}_i(1+\varepsilon_X), \overline{x}_{i+1}, ..., \overline{x}_{nx}) - \overline{\mu}_{yj}}{\varepsilon_X \overline{x}_i}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_X = 0,01...0,02.$$

Эти производные по существу характеризуют чувствительность динамических коэффициентов к случайным вариациям различных входных параметров – элементов вектора X.

Расчеты производных по (17) и (18) выполнены при следующих исходных данных:

$$\overline{a}_1 = \overline{a}_2 = l/4;\ A_l = 0,001;\ A_{a1} = A_{a2} = 0,002;\ \overline{m}_1 = \overline{m}_2;\ A_{m1} = A_{m2} = 0,01;$$
$$A_{EI} = 0,02;\ A_{\omega F} = 0,01;\ \overline{m}_d = 0,02\,\overline{m}_1;\ A_{md} = 0,015;\ A_{cd} = 0,02.$$

Для коэффициента динамичности μ_{y2}, имеющего основное значение в расчете амплитуды динамического напряжения в наиболее опасном сечении 2 (в месте действия нагрузки), получены результаты, представленные в виде графиков на рис. 3. Поскольку изменчивость расчетных параметров системы и нагрузки проявляются по-разному в области резонансной частоты, которая при наличии гасителя колебаний оказывается близкой к расчетной рабочей частоте, то графики производных $\partial\mu_{y2}/\partial m_d$, $\partial\mu_{y2}/\partial c_d$, $\partial\mu_{y2}/\partial\omega_F$ и $\partial\mu_{y2}/\partial m$ даны в зависимости от МО частоты нагрузки $\overline{\omega}_F$ в окрестности математического ожидания заданной рабочей частоты, принятого равным $0,8\,\overline{\omega}^0_{\min}$ ($\overline{\omega}^0_{\min}$ – МО минимальной собственной частоты незащищенной конструкции).

Производные коэффициента динамичности μ_{y2} по геометрическим, жесткостным и инерционным параметрам защищаемой конструкции (балки) на несколько порядков меньше, чем по m_d, c_d, ω_F (пример – на рис. 3, *г* для $\partial\mu_{y2}/\partial m$).

Аналогично вычислены также производные коэффициента μ_{y1} – их значения меньше соответствующих величин для μ_{y2}.

На рис. 4 показаны графики изменения вероятности отказа по условному критерию непревышения динамическим коэффициентом μ_{y2} значения его математического ожидания для незащищенной конструкции ($\mu_{y2} \le \overline{\mu}^0_{y2}$).

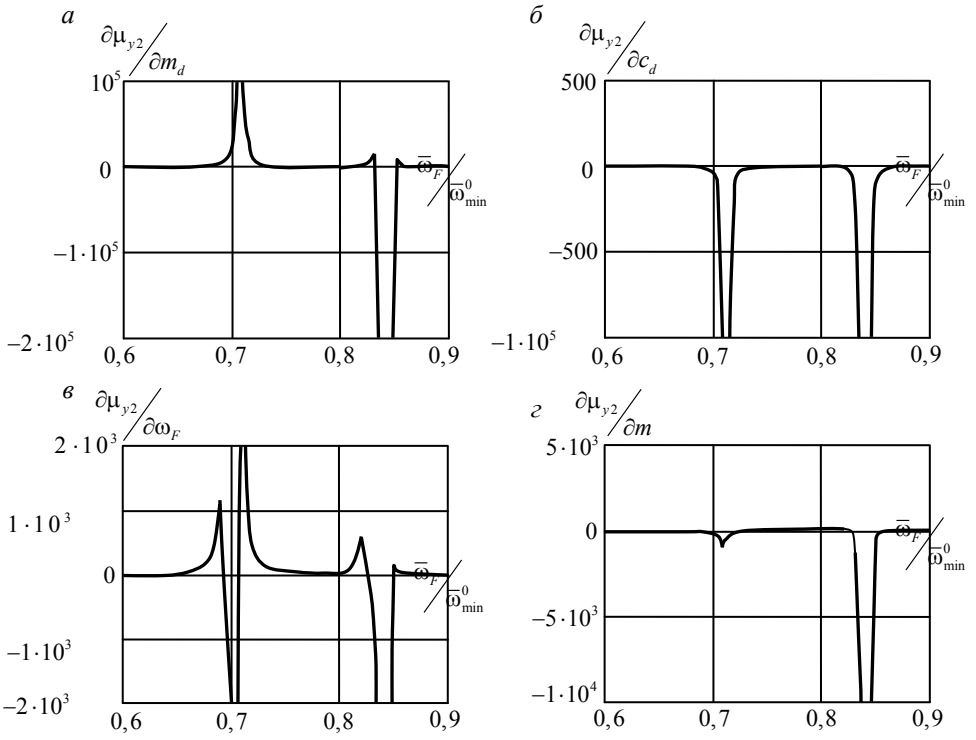


Рис. 3. Производные коэффициента μ_{y2} в зависимости от частоты $\bar{\omega}_F$:
а – $\partial\mu_{y2}/\partial m_d$; *б* – $\partial\mu_{y2}/\partial c_d$; *в* – $\partial\mu_{y2}/\partial\omega_F$; *г* – $\partial\mu_{y2}/\partial m$

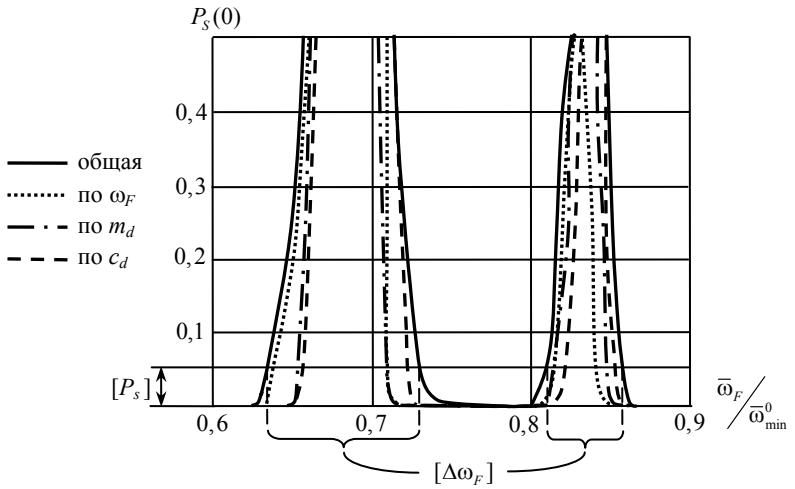


Рис. 4. Вероятности отказа по условию $\mu_{y2} \le \bar{\mu}^0_{y2}$ в зависимости от частоты $\bar{\omega}_F$

Верхний график – вероятность отказа с учетом изменчивости всех расчетных параметров балки и нагрузки. Остальные описывают, в зависимости

от частоты $\bar{\omega}_F$, вероятности отказа с учетом вариативности каждой из случайных величин m_d, c_d и ω_F в отдельности при фиксированных (детерминированных) остальных компонентах вектора входных параметров X. Вероятности отказа вследствие изменчивости геометрических, жесткостных и инерционных характеристик балки пренебрежимо малы, и на рис. 4 в сопоставимом масштабе не могут быть показаны.

Полученные количественные результаты модельного численного эксперимента подтверждают сделанные выше качественные оценки влияния на характеристики надежности случайных вариаций различных расчетных параметров системы и нагрузки.

Графики, аналогичные представленным на рис. 4, но построенные по полному комплексу условий безотказности, дают возможность находить области допустимых при требуемом уровне надежности (или допустимой вероятности отказа) статистических характеристик параметров защищаемого объекта, гасителя и нагрузки. На рис. 4 как $[\Delta\omega_F]$ обозначен интервал недопустимых значений МО частоты вибрационной нагрузки при допустимой вероятности отказа $[P_s]$.

Выводы

1. Неконтролируемые случайные разбросы значений геометрических, жесткостных и инерционных характеристик гармонически нагруженной конструкции даже при наличии гасителя колебаний могут порождать в системе резонансные эффекты, приводящие в недопустимому снижению показателей надежности. Более того, влияние гасителя может быть негативным.

2. Решением обратной задачи расчета надежности, практически осуществляемым посредством прямых перерасчетов при варьировании вероятностных характеристик основных параметров защищаемой системы и гасителя, следует вычислять допустимые комбинации их математических ожиданий и стандартов (либо коэффициентов изменчивости), обеспечивающих требуемую надежность.

3. В расчетах надежности сооружений и конструкций, оснащенных динамическими гасителями колебаний, при вибрационных воздействиях наиболее значимыми являются частота ω_F и амплитуда F нагрузки, а также масса гасителя m_d и жесткость c_d его упругого элемента. Изменчивостью характеристик глобальной геометрии системы можно пренебрегать, рассматривая их как квазидетерминированные. Вариативность параметров жесткости и масс защищаемой конструкции должна учитываться при плохих показателях их стохастических свойств (при коэффициентах вариации, сопоставимых с соответствующими коэффициентами для амплитуды нагрузки и прочностных характеристик материала).

4. Учет демпфирующих свойств защищаемой системы и гасителя колебаний улучшает количественные оценки надежности, но качественные заключения, изложенные выше, сохраняют силу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ляхович, Л.С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений : моногр. / Л.С. Ляхович. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. – 372 с.
2. *Коренев, Б.Г., Резников Л.М.* Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. – М. : Наука, 1988. – 304 с.
3. *Дукарт, А.В.* Задачи теории ударных гасителей колебаний : моногр. / А.В. Дукарт. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 205 с.
4. *Osamu, N.* Closed-form solutions to the exact optimizations of dynamics vibration absorbers (minimizations of the maximum amplitude magnification factors) / N. Osamu, A. Toshihiko // Journal of Vibration and Acoustics. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 2002. – V.124. – No. 4. – P. 576–582.
5. *Себешев, В.Г.* Динамика деформируемых систем с конечным числом степеней свободы масс / В.Г. Себешев. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2011. – 227 с.
6. *Почтман, Ю.М.* Оптимальное проектирование конструкций с учетом надежности / Ю.М. Почтман, Л.Е. Харитон // Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – № 6. – С. 8–15.
7. *Vrouwenvelder, T.* Treatment of risk and reliability in the Eurocodes / T. Vrouwenvelder // Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. – 2008. – V. 161. – issue SB4 (August). – P. 209–214.
8. *Hang, E.J.* Design Sensitivity Analysis of Structural Systems / E.J. Hang, K.K. Choi, V. Komkov // Mathematics in Science and Engineering. V. 17. – New York : Academic Press, 1986. – 426 p.
9. *Себешев, В.Г.* Особенности работы статически неопределимых систем и регулирование усилий в конструкциях / В.Г. Себешев. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2009. – 164 с.
10. *Себешев, В.Г.* Оценка надежности и долговечности по условию усталостной прочности стержневых систем с динамическим гасителем колебаний при гармонических воздействиях / В.Г. Себешев, Ю.А. Гербер // Проблемы оптимального проектирования сооружений : доклады 3-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 15–17 апреля, 2014 г. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 367–380.
11. *Ржаницын,* А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1978. – 239 с.

REFERENCES

1. *Lyakhovich L.*S. Osobye svoistva optimal'nykh sistem i osnovnye napravleniya ikh realizatsii v metodakh raschyota sooruzhenii [Special properties of optimal systems and their structural design]. Tomsk : TSUAB Publ., 2009. 372 p. (rus)
2. *Korenev B.G., Reznikov L.M.* Dinamicheskiye gasiteli kolebanii: Teoriya i tekhnicheskiye prilozheniya [Dynamic vibration dampers: Theory and engineering applications]. Moscow : Nauka Publ., 1988. 304 p. (rus)
3. *Dukart A.V.* Zadachi teorii udarnykh gasiteley kolebanii [Problems of the impact dampers of vibrations theory]. Moscow : ASV Publ., 2006. 205 p. (rus)
4. *Osamu N.*, *Toshihiko A.* Closed-form solutions to the exact optimizations of dynamics vibration absorbers (minimizations of the maximum amplitude magnification factors). *Journal of Vibration and Acoustics. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 2002. V. 124. No. 4. Pp. 576–582.
5. *Sebeshev V.G.* Dinamika deformiruemykh sistem s konechnym chislom stepeney svobody mass [Dynamics of deformable systems with the finite number of degree of freedom]. Novosibirsk : SIBSTRIN Publ., 2011. 227 p. (rus)
6. *Pochtman Yu.M., Khariton L.Ye.* Optimal'noye proektorovaniye konstruktsii c uchyotom nadyozhnosti [Optimum reliability design analysis]. *Stroit. mekh. i raschet sooruzhenii.* 1976. No. 6. Pp. 8–15. (rus)

7. *Vrouwenvelder T.* Treatment of risk and reliability in the Eurocodes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, 2008. V. 161. No. SB4. Pp. 209–214.
8. *Hang E.J., Choi K.K., Komkov V.* Design Sensitivity Analysis of Structural Systems. *Mathematics in Science and Engineering*. New York : Academic Press, 1986. V. 17. 426 p.
9. *Sebeshev V.G.* Osobennosti raboty staticheski neopredelimykh sistem i regulirovanie usilii v kostruktsiyakh [Behavior of statically indeterminate systems and internal force control]. Novosibirsk : SIBSTRIN Publ., 2009. 164 p. (rus)
10. *Sebeshev V.G., Gerber Yu.A.* Otsenka nadyozhnosti i dolgovechnosti po usloviyu ustalostnoi prochnosti sterzhnevykh sistem s dinamicheskim gasitelem kolebanii pri garmonicheskikh vozdeistviyakh [Reliability and fatigue life evaluation of bar systems with vibration damper at harmonic loads]. *Proc. All-Rus. Conf. 'Problems of Optimal Design of Structures',* Novosibirsk : SIBSTRIN Publ., 2014. Pp. 367–380. (rus)
11. *Rzhanitsyn A.R.* Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsii na nadyozhnost' [Theory of reliability design analysis]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1978. 239 p.(rus)

УДК 624.045.04

ГРЕБЕНЮК ГРИГОРИЙ ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
greb@sibstrin.ru
ВЕШКИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ, ст. преподаватель,
max.vs@list.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА И ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК

Изложен подход к расчету стержневых систем при действии динамической (импульсной) нагрузки, основанный на аппроксимации зависимости импульсной нагрузки от времени на заданном интервале действия. Предложена методика декомпозиции исходной задачи оптимизации путем направленного обобщения варьируемых параметров сечений элементов. Поставлена задача весовой оптимизации 5-этажной двухпролетной стальной рамы. Проведен анализ результатов решения задачи оптимизации при варьировании параметров сечений и числа групп оптимизируемых элементов.

Ключевые слова: стержневая система; импульсные нагрузки; расчет; оптимизация; декомпозиция; направленное обобщение.

GRIGORI I. GREBENYUK, DSc, Professor,
greb@sibstrin.ru
MAKSIM S. VESHKIN, Senior Lecturer,
max.vs@list.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia

LOGICAL DESIGN OF NUMERICAL CALCULATION AND OPTIMIZATION OF BAR SYSTEMS UNDER DYNAMIC LOADS

The paper presents a design approach to bar system under dynamic (impulse) load which is based on time dependence approximation in a specified interval. The methodology of decomposing the original problem of optimization is suggested using the directional generalization of varied parameters of member cross-sections. The problem of weight optimization is set for the 5-storey double steel frame. The analysis of results obtained is presented herein at varying sectional parameters and the number of members to be optimized.

Keywords: bar system; impulse load; calculation; optimization; decomposition; directional generalization.

Введение

Динамические нагрузки, вызванные различными внешними факторами, играют существенную (а часто и определяющую) роль при выявлении напряженно-деформированного состояния сооружений. Это в полной мере относится и к импульсным нагрузкам, причем протяженность и форма импульса (при

одинаковой его мощности) достаточно ощутимо сказываются на динамической реакции системы. В настоящее время детально разработан и описан в литературе математический аппарат, основанный на численном интегрировании уравнений динамического равновесия в рамках МКЭ [1–3]. Вместе с тем представляет интерес разработка эффективных по затратам времени численных алгоритмов расчета, основанных на приближенном описании импульсной нагрузки в виде суммы простых одночленных функций. Это особо важно в задачах оптимизации сложных многоэлементных конструкций, когда выбранный алгоритм оптимизации требует значительного числа перерасчетов оптимизируемых систем. В свою очередь, актуальной является и задача разработки эффективных численных алгоритмов оптимизации, ориентированных на использование разработанного численного алгоритма расчета оптимизируемых систем.

1. Алгоритм численного расчета стержневой системы при действии произвольного импульса

Уравнения состояния динамически нагруженной стержневой системы представим с позиций метода перемещений КЭ без учета демпфирования в виде

$$K_m \ddot{\bar{Z}}(t) + K_e \bar{Z}(t) + \bar{R}_F(t) = 0, \qquad (1)$$

где K_m, K_e – матрицы инерционных и упругих коэффициентов; $R_F(t) = r_F F(t)$ – вектор, обобщающий заданные силовые воздействия; r_F – матрица порядка $r \times f$, r – число степеней свободы узлов системы, f – число заданных силовых воздействий.

Решение $Z(t) \in E^r$ матричного дифференциального уравнения (1) на каком-либо временном интервале $t_n \le t \le t_k$ представим в виде суммы:

$$Z(t) = \bar{Z}(t) + \tilde{Z}(t), \qquad (2)$$

где $\bar{Z}(t)$ – общее решение однородного уравнения;

$K_m \ddot{\bar{Z}}(t) + K_e \bar{Z}(t) = 0$; $\tilde{Z}(t)$ – частное решение (1).

Вектор $\bar{Z}(t)$ записывается в виде матричного произведения $\bar{Z}(t) = D \cdot C \cdot A,$

где $D = \begin{bmatrix} d_{11}\, d_{11} \ldots d_{1r}\, d_{1r} \\ \vdots \quad \vdots \quad\quad \vdots \quad \vdots \\ d_{r1}\, d_{r1} \quad\quad d_{rr}\, d_{rr} \end{bmatrix}$ – матрица сдвоенных собственных векторов;

$$C=\begin{bmatrix}\sin(\omega_1 t) & & & & \\ & \cos(\omega_1 t) & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \sin(\omega_r t) & \\ & & & & \cos(\omega_r t)\end{bmatrix};\ A=\begin{Bmatrix}a_1\\ a_2\\ \vdots\\ a_{2r}\end{Bmatrix}$$ – вектор постоянных интегрирования.

При получении частного решения вектор заданных силовых воздействий удобно аппроксимировать в заданном интервале времени $t_n \le t \le t_k$ соотношением $F(t)=B\cdot L(t)$,

где B – числовая матрица $f\times m_F$; $L(t)$ – m_F-мерный вектор заданных одночленных функций.

Частное решение $\tilde{Z}(t)$ представляется в аналогичном виде

$$\tilde{Z}(t)=Q\cdot L(t),$$

где Q – искомая числовая матрица порядка $r\times m_F$. Составляющие матрицы Q для заданного интервала $[t_n,t_k]$ находятся из решения системы линейных уравнений после подстановки $F(t)$, $\tilde{Z}(t)$ в (1).

Составляющие вектора A постоянных интегрирования на 1-м участке находятся из условий $Z(t)\big|_{t=0}=0;\dot{Z}(t)\big|_{t=0}=0$.

На последующих временных интервалах постоянные интегрирования находятся из условий стыковки соседних интервалов.

Результаты тестовых расчетов по программе, разработанной на основе предложенного алгоритма, свидетельствуют об их малой трудоемкости и хорошей точности (разница числовых значений усилий, перемещений и собственных частот со значениями, полученными с использованием, например, программы ANSYS, составляла 3–5 %).

2. Итерационный алгоритм оптимизации стержневой системы с использованием направленного обобщения переменных проектирования

В первых работах в области оптимизации конструкций рассматривались, как правило, достаточно простые системы при статическом нагружении [4–6]. При этом для решения задач оптимизации использовались, как правило, численные алгоритмы прочностного перерасчета. В дальнейшем для постановки и решения подобных задач стали активно применяться методы математического программирования с выбором целевой функции, построением системы ограничений и разработкой методов их аппроксимации [7, 8]. Отдельно здесь следует выделить классы задач оптимизации, в которых традиционная система ограничений по прочности и жесткости дополнялась ограничениями по устойчивости и частотам собственных колебаний [9–13], причем в работах [11–13] большое внимание уделено получению характеристик оптимальных систем. Значительно меньше работ было посвящено разработке алгоритмов

решения задач оптимизации конструкций при динамическом нагружении. В ряде ранних работ [14, 15] для решения использовались схемы итерационного перерасчета. В дальнейшем более активно стала применяться постановка в форме задачи математического программирования [16–18]. Общим недостатком этих алгоритмов была их большая трудоемкость при большой размерности пространства проектирования. В связи с этим в данной работе предлагается алгоритм, позволяющий существенно понизить трудоемкость расчетов при сохранении высокой точности решения.

Общая блок-схема предложенного алгоритма оптимизации параметров сечений динамически нагруженных стержневых систем представлена на рис. 1.

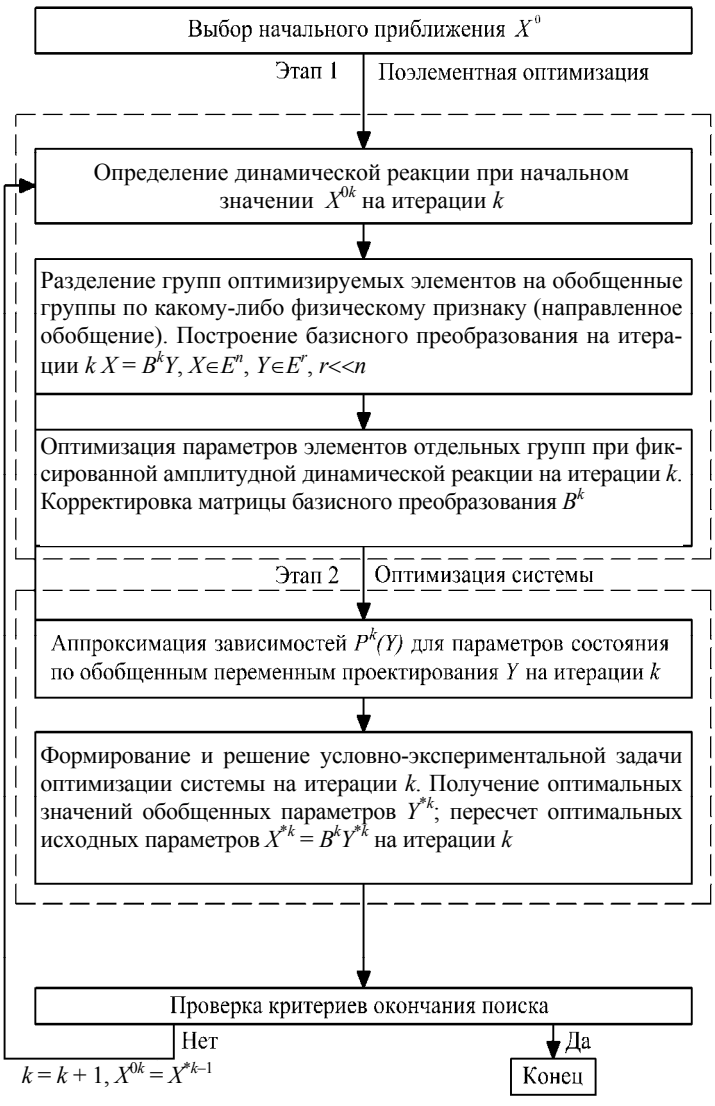


Рис. 1. Общая блок-схема алгоритма оптимизации

Как следует из рис. 1, процесс оптимизации в общем случае представлен как итерационный и двухэтапный. На первом этапе каждой итерации проводится разделение групп оптимизируемых элементов (групп ОЭ) на обобщенные группы по какому-либо критерию и решение задач поэлементной оптимизации при фиксированных усилиях в элементах. На втором этапе итерации формируется и решается задача оптимизации системы как задача математического программирования в обобщенном пространстве проектирования. Представленная на рис. 1 итерационная схема может быть упрощена путем исключения процедур поэлементной оптимизации и аппроксимации параметров состояния (форма сечений элементов групп задана, а параметры состояния определяются путем непосредственного обращения к процедуре перерасчета системы в рамках выбранного поискового метода).

Для обобщения пространства проектирования, например, по нагруженности ОЭ необходимо определять достаточный для анализа динамического отклика интервал времени $[t_n; t_k]$ на итерациях. Перед разделением групп Э на обобщенные группы по нагруженности необходимо определить величины максимальных значений эквивалентных напряжений

$$\max_{t_n \le t \le t_k} \sigma_{\text{экв}i\max}(X^{0k}, t) = \sigma_{\text{экв}i\max}(X^{0k}; t_{\text{ОП}}^{ik}), \tag{1}$$

где $i = 1, \ldots, NGE$; NGE – число групп ОЭ; $t_{\text{ОП}}^{ik}$ – опасный момент времени для элементов i-й группы на итерации k.

В дальнейшем процесс разделения групп ОЭ на две обобщенные группы выполняется следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{если} \quad \sigma_{\text{экв}i\max}(X^{0k}, t_{\text{ОП}}^{ik}) \ge \sigma_{\text{экв}m}, i \in I_1; \\ &\text{если} \quad \sigma_{\text{экв}i\max}(X^{0k}, t_{\text{ОП}}^{ik}) < \sigma_{\text{экв}m}, i \in I_2, \end{aligned} \tag{2}$$

где $\sigma_{\text{экв}m}$ – среднее эквивалентное напряжение для групп ОЭ системы; I_1, I_2 – множества номеров более и менее нагруженных групп ОЭ. Пересчет исходных переменных в процессе поиска оптимального решения на итерации осуществляется с использованием сформированной матрицы базисного преобразования

$$X = B^k \cdot Y, \tag{3}$$

где $B^k = \begin{bmatrix} b_{11}^k & b_{12}^k \\ \vdots & \vdots \\ b_{n1}^k & b_{n2}^k \end{bmatrix}$; $b_{i1}^k = \begin{cases} X_i^{0k}, \text{ если } i \in I_1, \\ 0, \text{ если } i \in I_2; \end{cases}$ $b_{i2}^k = \begin{cases} 0, \text{ если } i \in I_1, \\ X_i^{0k}, \text{ если } i \in I_2; \end{cases}$ (4)

$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{Bmatrix}$ – вектор обобщенных переменных проектирования.

3. Пример решения задачи оптимизации

В качестве примера для проведения расчетов и оптимизации принята рамная стержневая система (рис. 2), нагруженная вертикальной статической нагрузкой от веса перекрытий и полезной поэтажной нагрузки (рис. 3), а также распределенной горизонтальной импульсной нагрузкой $q(t)$ (рис. 4).

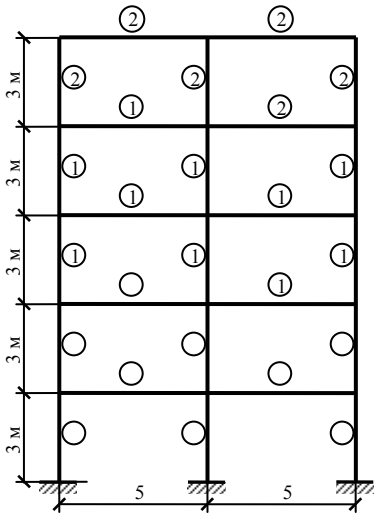


Рис. 2. Схема рамы

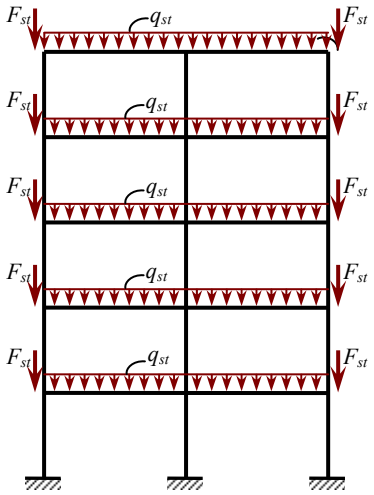


Рис 3. Схема статических нагрузок на раму

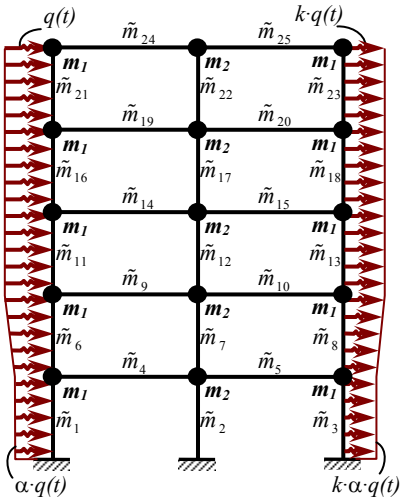


Рис. 4. Схема динамических нагрузок на раму

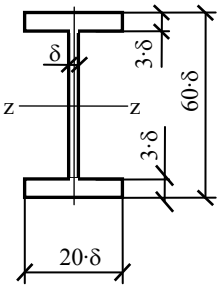


Рис. 5. Форма сечений элементов рамы

Коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения динамической нагрузки по высоте $\alpha = 0{,}842105$, и снижение нагрузки со стороны отрица-

тельного давления k = 0,625 приняты согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия». Форма сечений всех элементов рамы принята одинаковой (рис. 5), что позволяет в данном случае исключить процедуру поэлементной оптимизации. Суммарная величина интенсивности импульсной нагрузки одинакова для всех форм и длительностей импульсов и равна

$$\overline{q}_1 = \int_0^T q(t)\,dt = 0{,}969 \ \left(\text{кН}\cdot\text{с/м}\right), \tag{5}$$

где T – время передачи импульсной нагрузки. Функция $q(t)$ задается в виде

$$q(t) = q_a \cdot f(t),\ q_a = 4{,}845 \ \left(\text{кН/м}\right), \tag{6}$$

где $f(t)$ – безразмерная функция времени; $q_a\left(\text{кН/м}\right)$ – постоянная величина.

С целью исследования влияния формы импульсной нагрузки на величины максимальных эквивалентных напряжений в группах ОЭ были рассмотрены три варианта передачи распределенного импульса конечной протяженности (рис. 6, *а*, *б*, *в*):

– прямоугольный импульс $f(t) = 1{,}0$,

– синусоидальный импульс $f(t) = 1{,}5708 \cdot \sin\dfrac{\pi t}{T}$;

– импульс в форме волны, с участками нарастающей и убывающей интенсивностей.

$$f_1(t) = \frac{4t}{T} + 0{,}5 \cdot \sin\frac{2\pi t}{T};\ f_2(t) = 2 - \frac{4(t - 0{,}5T)}{T} - 0{,}5 \cdot \sin\frac{2\pi t}{T}. \tag{7}$$

Протяженность T импульсной нагрузки принята равной 0,2 с. При этом все варианты $f(t)$ имеют одинаковую площадь, т. е. значения импульса для всех вариантов форм одинаковые.

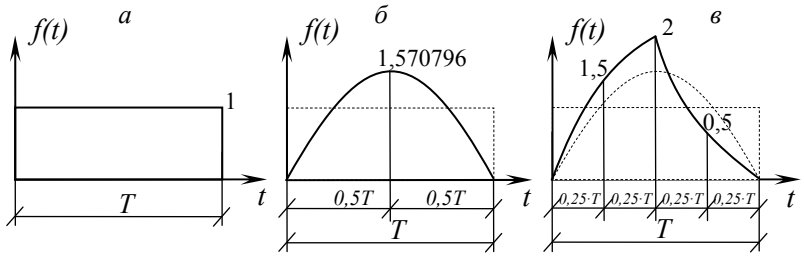


Рис. 6. Формы импульса

Результаты расчетов показали, что наиболее опасной является форма импульса *в*, которая в дальнейшем используется при проведении перерасчетов рамы в процессе оптимизации.

Оптимизация рамы выполнялась без использования аппроксимации параметров состояния. В качестве варьируемых приняты величины параметра δ в группах элементов: $X_i = \delta_i$, $i=1...NGE$, NGE – число групп оптимизируемых элементов. Критерием оптимальности принят минимум объема материала элементов рамы.

Задача оптимизации рамы ставится как задача нелинейного математического программирования:

требуется найти $\min f(X) = \sum_{i=1}^{NGE} 174 X_i^2 L_i$ (8)

при ограничениях по прочности

$$\sigma_{\text{экв}i\max}(X,t) / R - 1,0 \le 0,\ i = 1, NGE \quad (9)$$

и жесткости

$$V_{\max}(X,t) / [V] - 1,0 \le 0., \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{экв}i\max}(X,t)$ – максимальное эквивалентное напряжение в элементах i-й группы; $V_{\max}(X,t)$ $[V]$ – максимальное и допускаемое горизонтальные перемещения верхнего узла рамы.

Для решения формируемых на итерациях условно-экстремальных задач использован метод подвижного внешнего строфа. В свою очередь, решение безусловно-экстремальных задач, к которым сводятся исходные условно-экстремальные задачи, выполняется с использованием метода деформируемого многогранника.

Элементы рамы объединены в группы ОЭ. Параметры сечений элементов в группе ОЭ имеют одинаковые значения. Использованы следующие варианты объединения элементов в группы:

– 1 группа ОЭ (все элементы рамы одного сечения);

– 2 группы ОЭ (1-я группа – ригели ; 2-я группа – колонны);

– 15 групп ОЭ по 3 группы на каждом этаже (1-я группа на этаже – крайние колонны; 2-я группа на этаже – средняя колонна; 3-я группа на этаже – ригели).

В табл. 1, 2 приведены основные результаты проведенных вычислений.

Как видно из табл. 1, проект рамы с одинаковыми сечениями всех элементов требует расхода стали на 29,8 % больше, чем проект с двумя группами ОЭ. При 15 группах ОЭ экономия материала по сравнению с проектом с одной группой ОЭ составляет 42,8 %, но значительно увеличивается трудоемкость расчетов. Использование направленного обобщения переменных проектирования позволило, с одной стороны, получить проект, сопоставимый по расходу материала с проектом, полученным в исходном пространстве проектирования (разница составляет 4,4 %), а с другой стороны, существенно сократить трудоёмкость расчетов.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, в целом, качественно соответствуют результатам, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оптимизации рамы с ограничениями по прочности

Число групп ОЭ	Значение целевой функции м^3	Значения параметров X_i, мм	Наибольшая невязка ограничения по прочности	Количество перерасчётов
1	1,22	8,108	–	20
2	0,940	6,91, 8,19	0,000212	26
15	0,698	4,49–8,44	0,0114	198
15 (с направленным обобщением групп ОЭ)	0,730	5,51–7,84	–	84

Наличие активного ограничения по жесткости (допускаемое горизонтальное перемещение $[V]$ верхнего узла рамы принято равным 0,015 м) привело к существенному увеличению расхода материала на раму и несколько снизило эффективность направленного обобщения переменных проектирования.

Таблица 2

Результаты оптимизации рамы с ограничениями по прочности и жесткости

Число групп ОЭ	Значение целевой функции м^3	Значения параметров X_i, мм	Наибольшая невязка ограничения по прочности	Наибольшая невязка ограничения по жёсткости	Количество перерасчётов
2	0,949	0,708; 0,809	0,018	0,050633	22
15	0,905	0,508–1,4	0,0106	0,00467	836
15 (с направленным обобщением групп ОЭ)	0,928	0,653–0,853	–	0,050633	57

Выводы

1. Разработанный и программно реализованный алгоритм численного расчета обладает сравнительно невысокой трудоёмкостью, хорошей точностью и может успешно использоваться при решении задач оптимизации стержневых систем, подверженных совместному действию статических и динамических нагрузок.

2. Предложенный и программно реализованный итерационный алгоритм многопараметрической оптимизации динамически нагруженных стержневых систем с направленным обобщением переменных проектирования быстро сходится и позволяет существенно снизить трудоемкость процесса оптимизации.

3. При активном ограничении по жесткости эффективность обобщения по нагруженности групп ОЭ снижается, и необходимо использовать другой критерий обобщения, например критерий удельного вклада в активное перемещение, связанного с деформацией группы ОЭ.

Библиографический список

1. *Зенкевич, О.С.* Метод конечных элементов в технике / О.С. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 544 с.
2. *Клаф, Р.* Динамика сооружений / Р. Клаф, Д. Пензиен. – Стройиздат, 1979. – 320 с.
3. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.
4. *Шмит, Л.А.* Возникновение и развитие методов синтеза конструкций / Л.А. Шмит // Ракетная техника и космонавтика. – 1981. – Т. 19. – №11. – С. 3–22.
5. *Schmit, L.A.* Structural Optimization – Some Key Ideas and Insights / L.A. Schmit // New Directions in Optimum Structural Design. – Ed. E. Atrek et Al. Chichester: Wiley, 1984. – P. 1–45.
6. *Радциг, Ю.А.* Статические неопределимые фермы наименьшего веса / Ю.А. Радциг. – Казань : Изд-во Казанского ун-та. – 1969. – 287 с.
7. *Малков, В.П.* Оптимизация упругих систем / В.П. Малков, А.Г. Угодчиков. – М. : Наука, 1981. – 288 с.
8. *Лазарев, И.Б.* Основы оптимального проектирования конструкций. Задачи и методы / И.Б. Лазарев. – Новосибирск : СГУПС, 1995. – 295 с.
9. *Гринев, В.Б.* Оптимизация стержней по спектру собственных значений / В.Б. Гринев, А.П. Филиппов. – Киев : Наукова думка, 1979. – 212 с.
10. *Фокс, Р.* Скорость изменения собственных значений и собственных векторов / Р. Фокс, М. Канур. – РТиК, 1968. – № 12. – С. 227–230.
11. *Ляхович, Л.С.* Оптимизация несущей способности по устойчивости и частоте колебаний / Л.С. Ляхович, А.П. Малиновский // Пространственные конструкции в Красноярском крае, 1979. – № 12. – С. 103–113.
12. *Ляхович, Л.С.* Оптимальное проектирование стержневых систем с кусочно-линейными характеристиками связей, находящихся под действием параметрической нагрузки / Л.С. Ляхович, А.Л. Иванов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1984. – № 11. – С. 25–28.
13. *Ляхович, Л.С.* Критерий оптимальности связей в задачах устойчивости и собственных колебаний упругих систем / Л.С. Ляхович, А.Н. Плахотин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 7. – С. 26–29.
14. *Рабинович, И.М.* Расчет конструкций минимального веса под действием кратковременных динамических нагрузок / И.М. Рабинович. – М. : ВИА, 1965. – 101 с.
15. *Feng, T.T.* Optimal Structural Design under Dynamic Loads / T.T. Feng, J.S. Arora, E.J. Haug // Int. J. Numerical Methods in Eng. – 1977. – V. 11. – № 1. – P. 39–52.
16. *Якимова, Х.* Проектирование оптимальных динамически нагруженных конструкций / Х. Якимова // Новые направления в строительном проектировании. – М. : Стройиздат, 1989. – С. 245–262.
17. *Гребенюк, Г.И.* Расчет и оптимизация гармонически нагруженных систем с использованием различных приёмов декомпозиции / Г.И. Гребенюк, В.И. Роев, М.А. Димитров // Доклады 5-го Всероссийского семинара «Проблемы оптимального проектирования сооружений». – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2005. – С. 119–131.
18. *Гребенюк, Г.И.* Дискретные модели расчета и оптимизации стержневых конструкций при импульсном нагружении / Г.И. Гребенюк, М.С. Вешкин // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 1.– С. 36–39.

REFERENCES

1. *Zenkevich O.S.* Metod konechnykh elementov v tekhnike. [Method of finite elements in engineering] Moscow : Mir Publ., 1975. 544 p. (rus)
2. *Clough R.W., Penzien J.* Dinamika sooruzhenii.[Dynamics of structures.] Stroyizdat Publ., 1979. 320 p. (transl. from Engl.)
3. *Bathe K.-J., Wilson E.L.* Chislennye metody analiza i metod konechnykh elementov [Numerical methods in finite element analysis]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982. 448 p. (transl. from Engl.)
4. *Shmit L.A.* Vozniknovenie i razvitie metodov sinteza konstruktsii [Emergence and development of structural synthesis methods]. *AIAA Journal: Devoted to aerospace research and development,* 1981. V. 19. No. 11. Pp. 3–22. (rus)
5. *Schmit L.A.* Structural Optimization Some Key Ideas and Insights. In: New Directions in Optimum Structural Design. Ed. E. Atrek et al. Chichester : Wiley, 1984. 145 p.
6. *Radtsig Yu.A.* Staticheskie neopredelimye fermy naimen'shego vesa [Statically indeterminate frames of the lowest weight]. Kazan': Kazan University Publ., 1969. 287 p. (rus)
7. *Malkov V.P. Ugodchikov A.G.* Optimizatsiya uprugikh system [Optimization of elastic systems]. Moscow : Nauka Publ., 1981. 288 p. (rus)
8. *Lazarev I.B.* Osnovy optimal'nogo proektirovaniya konstruktsii. Zadachi i metody [Bases of optimum design of designs. Tasks and methods]. Novosibirsk : SGUPS Publ., 1995. 295 p. (rus)
9. *Grinev V.B. Filippov A.P.* Optimizatsiya sterzhnei po spektru sobstvennykh znachenii [Bar optimization by eigenvalue spectrum]. Kiev : Naukova Dumka Publ., 1979. (rus)
10. *Foks R., Kanur M.* Skorost' izmeneniya sobstvennykh znachenii i sobstvennykh vektorov [Rate of change of eigenvalues and eigenvectors]. RTiK Publ., 1968. No. 12. Pp. 227–230. (rus)
11. *Lyakhovich L.S., Malinovskii A.P.* Optimizatsiya nesushchei sposobnosti po ustoichivosti i chastote kolebanii [Optimization of carrying capacity by stability and oscillation frequency]. Prostranstvennye konstruktsii v Krasnoyarskom krae [Spatial structures in Krasnoyarsk Krai]. 1979. No. 12. Pp. 103–113. (rus)
12. *Lyakhovich L.S., Ivanov A.L.* Optimal'noe proektirovanie sterzhnevykh sistem s kusochno-lineinymi kharakteristikami svyazei nakhodyashchikhsya pod deistviem parametricheskoi nagruzki [Optimum design of bar systems piecewise linear characteristics]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1984. No. 11. Pp. 25–28. (rus)
13. *Lyakhovich L.S., Plakhotin A.N.* Kriterii optimal'nosti svyazei v zadachakh ustoichivosti i sobstvennykh kolebanii uprugikh sistem. [Optimum bond criteria in problems of stability and eigen frequency in elastic systems]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture.* 1986. No. 7. Pp. 26–29. (rus)
14. *Rabinovich I.M.* Raschet konstruktsii minimal'nogo vesa pod deistviem kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok [Minimum weight structural design under dynamic loads]. Moscow : VIA Publ., 1965. 101 p. (rus)
15. *Feng T.T., Arora J.S., Haug E.J.* Optimal Structural Design under Dynamic Loads. *Int. J. Numerical Methods in Eng.* 1977. V. 11 No. 1. Pp. 39–52. (rus)
16. *Yakimova Kh.* Proektirovanie optimal'nykh dinamicheski nagruzhennykh konstruktsii [Structural design of optimum dynamic loads]. Novye napravleniya v stroitel'nom proektirovanii. Moscow : Stroyizdat Publ., 1989. Pp. 245–262. (rus)
17. *Grebenyuk G.I., Roev V.I., Dimitrov M.A.* Raschet i optimizatsiya garmonicheski nagruzhennykh sistem s ispol'zovaniem razlichnykh priemov dekompozitsii [Design and optimization of harmonically loaded systems]. *Proc. 5th All-Rus. Seminar 'Problems of Optimum Structural Design'.* Novosibirsk : SIBSTRIN Publ., 2005. Pp. 119–131. (rus)
18. *Grebenyuk G.I., Veshkin M.S.* Diskretnye modeli rascheta i optimizatsii sterzhnevykh konstruktsii pri impul'snom nagruzhenii [Discrete models of design and optimization of bar structures under impulse loads]. *The News of Altai State University.* 2012. No. 1. Pp. 36–39. (rus)

УДК 72:693.9(571.1)

ЗЕНКОВ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ, магистрант,
zenkoffilja@mail.ru
ГВОЗДЯКОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
zenkoffilja@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ВОПРОСЫ НАКОПЛЕНИЯ ВЛАГИ В ТОЛЩЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Проведен сравнительный анализ трех основных конструктивных схем наружных ограждающих конструкций (с наружным утеплением, с утеплителем в толще ограждения, с утеплением изнутри) с двумя видами утеплителя (экструдированным пенополистиролом, минераловатным утеплителем) при стационарном тепловом потоке. Целью анализа являлось выявление наиболее неблагоприятной с точки зрения образования конденсата конструкции наружных стен. Установлено, что при данных условиях конденсат может образоваться в толще наружной стены с утеплением изнутри (независимо от вида утеплителя).

Ключевые слова: многослойная ограждающая конструкция; точка росы; конденсат; зона конденсации; паропроницаемость; сопротивление паропроницанию; давление водяного пара.

IL'YA A. ZENKOV, Undergraduate Student,
zenkoffilja@mail.ru
VLADIMIR S. GVOZDYAKOV, PhD, A/Professor,
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

MOISTURE ACCUMULATION WITHIN EXTERIOR WALLS IN WESTERN SIBERIA

The paper presents the comparative analysis of three main structural layouts of exterior walls (with external and internal heat insulation) using two types of heat insulating material (extruded foam polystyrene, mineral wool) at a continuous heat flux. The purpose of the paper is to define the most unfavorable exterior wall structures in terms of condensing It is shown that condensate can be formed inside the exterior wall having the internal heat insulation irrespectively of the type of heat insulating material.

Keywords: multilayer exterior wall; dew point; condensate; condensation zone; vapor permeability; water-vapor resistance; water vapor pressure.

В современных условиях повсеместного ресурсо- и энергосбережения необходимым условием при новом строительстве и реконструкции является применение в наружных ограждениях утеплителя. Для данной статьи были рассмотрены и проанализированы 2 вида утеплителя (минераловатный утеплитель с $\lambda_Б$ = 0,04 Вт/(м·°С) и экструдированный пенополистирол

с $\lambda_Б$ = 0,032 Вт/(м·°С)) в трех видах конструкций наружных стен (рис. 1–3) при стационарном тепловом потоке. Параметры наружного воздуха приняты согласно СП 131.13330–2012 «Строительная климатология» для г. Томска. Параметры внутренней среды приняты согласно ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» для жилых помещений.

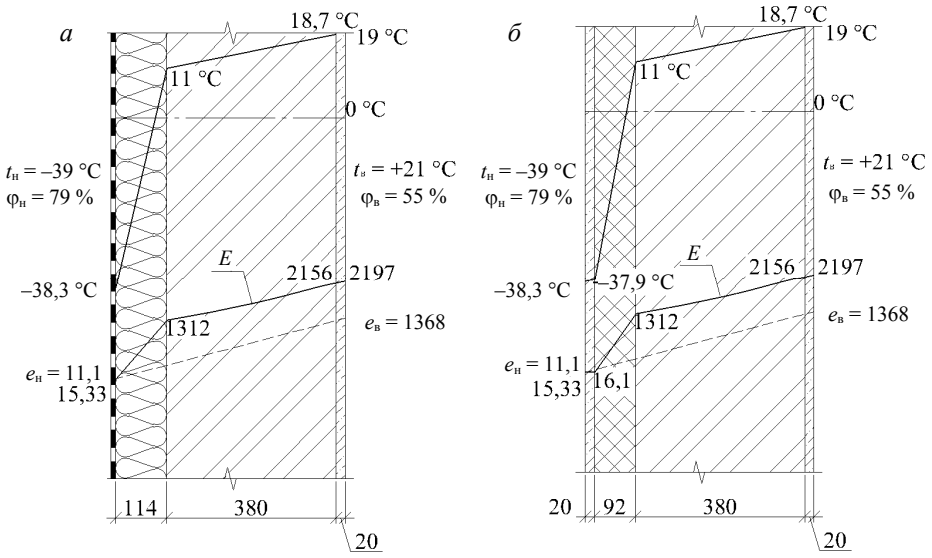


Рис. 1. Конструкция стен с утеплением снаружи минераловатным утеплителем (*а*), экструдированным пенополистиролом (*б*)

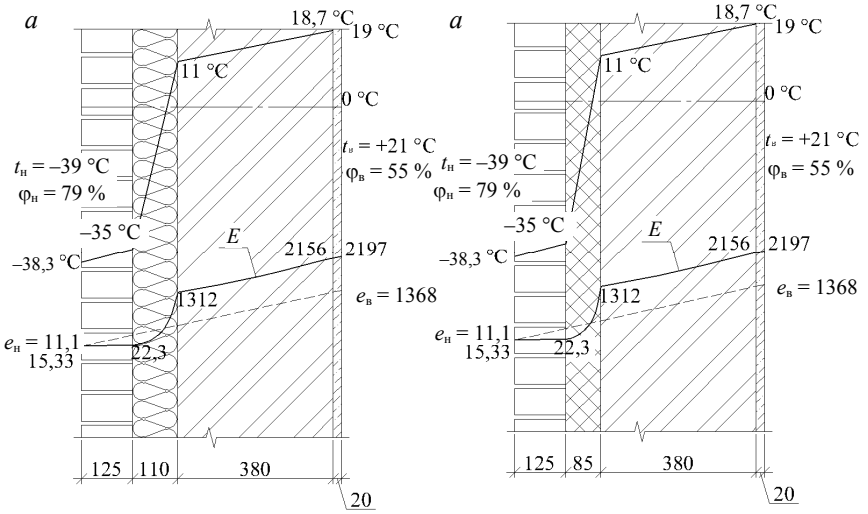


Рис. 2. Конструкция стен с утеплением в толще минераловатным утеплителем (*а*), экструдированным пенополистиролом (*б*)

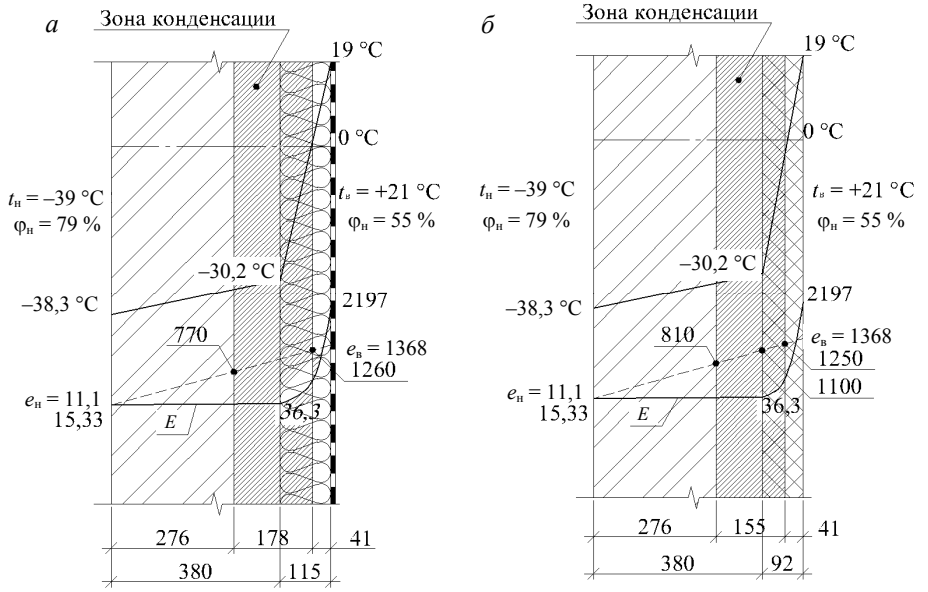


Рис. 3. Конструкция стен с утеплением внутри минераловатным утеплителем (*а*), экструдированным пенополистиролом (*б*)

Рассмотрим толщу ограждающей конструкции при следующих условиях:

$t_в$ = 21 °С, φ$_в$ = 50 %, $t_н$ = –39 °С, φ$_в$ = 79 %, $t_{о.п}$ = –7,9 °С, $z_{о.п}$ = 233 сут.

Сопротивление теплопередаче R_0 определяется согласно СП 50-13330–2012 «Тепловая защита зданий» по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_в} + R_1 + R_2 + ... + R_n + \frac{1}{\alpha_н}, \qquad (1)$$

где $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м^2·°С); $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м^2·°С); R_1, R_2 ... R_n – термическое сопротивление слоев конструкции, м^2·°С /Вт.

Для определения толщины утеплителя условно примем, что сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции R_0 для всех конструкций стен равно 3,5м^2·°С /Вт.

График распределения температур по толще ограждающей конструкции, график изменения максимальной упругости водяного пара *E*, МПа, линия падения упругости водяного пара *e,* МПа (пунктирная линия) показаны на рис. 1–3.

Для расчета влажностного режима стен используем графический метод. Так как на рис. 1, 2 линии *e* и *E* не пересекаются, значит, конденсации водяного пара в стене не будет. На рис. 3 линии *e* и *E* пересекаются, следовательно, в стене будет происходить конденсация водяного пара. Для построения действительной линии падения упругости водяного пара при

конденсации влаги в стене проводим из точек $e_В$ и $e_Н$ касательные прямые к линии E. Точки пересечения касательных с линией E и будут «зоной образования конденсата». Основное количество конденсата будет скапливаться на границе между кирпичной стеной и утеплителем.

Для определения количества водяного пара, поступающего к зоне конденсации и уходящего из стены, необходимо определить сопротивление паропроницанию слоев стены [2, 3]. Для стены с минераловатным утеплителем (рис. 3, *а*):

пароизоляционная пленка ..... $R_{П1} = 7$ м^2·ч·Па/мг

минераловатный утеплитель ..... $R_{П2} = \dfrac{\delta_2}{\mu_2} = \dfrac{0{,}115}{0{,}3} = 0{,}38$ м^2·ч·Па/мг

кирпичная кладка 380 мм..... $R_{П3} = \dfrac{\delta_3}{\mu_3} = \dfrac{0{,}38}{0{,}11} = 3{,}45$ м^2·ч·Па/мг

Тогда сопротивление всей стены [1]

$$R_{О.П.} = R_{В.П} + R_{П1} + R_{П2} + R_{П3} + R_{Н.П} = 10{,}87 \text{ м}^2\text{·ч·Па/мг}, \qquad (2)$$

где $R_{В.П}$ = 0,027 м^2·ч·Па/мг – сопротивление влагообмену у внутренней поверхности ограждения [1]; $R_{Н.П}$ = 0,013 м^2·ч·Па/мг – сопротивление влагообмену у наружной поверхности ограждения [1].

Количество водяного пара, поступающего к зоне конденсации в стене с минераловатным утеплителем (рис. 3, *а*) [1]:

$$P_1 = \frac{e_В - 1260}{R_{П1} + R'_{П2}} = \frac{1368 - 1260}{7 + 0{,}137} = 15{,}13 \text{ мг/(м}^2\text{·ч·Па)}, \qquad (3)$$

где $R'_{П2} = \dfrac{\delta'_2}{\mu_2} = \dfrac{0{,}042}{0{,}3} = 0{,}137$ м^2·ч·Па/мг.

Количество водяного пара, уходящего из стены от левой границы зоны конденсации в стене с минераловатным утеплителем (рис. 3, *а*) [1]:

$$P_2 = \frac{711 - e_Н}{R'_{П3}} = \frac{711 - 11{,}1}{2{,}51} = 302{,}4 \text{ мг/(м}^2\text{·ч·Па)}, \qquad (4)$$

где $R'_{П3} = \dfrac{\delta'_3}{\mu_3} = \dfrac{0{,}276}{0{,}11} = 2{,}51$ м^2·ч·Па/мг.

Так как $P_1 < P_2$, то можно сделать вывод, что конденсат свободно покидает толщу стены, не успевая накопить критическое количество водяного пара.

Для стены с экструдированным пенополистиролом (рис. 3, *б*):

пенополистирол ..... $R_{П1} = \dfrac{\delta_1}{\mu_1} = \dfrac{0{,}092}{0{,}008} = 11{,}5$ м^2·ч·Па/мг

кирпичная кладка 380 мм..... $R_{П2} = \dfrac{\delta_2}{\mu_2} = \dfrac{0{,}38}{0{,}11} = 3{,}45$ м^2·ч·Па/мг

Тогда сопротивление всей стены

$$R_{О.П.} = R_{В.П} + R_{П1} + R_{П2} + R_{Н.П} = 14{,}99 \text{ м}^2\text{·ч·Па/мг}, \qquad (5)$$

где $R_{\text{В.П}}$, $R_{\text{Н.П}}$ – то же, что и в формуле (2).

Количество водяного пара, поступающего к зоне конденсации в стене с экструдированным пенополистиролом (рис. 3, *б*) [1]:

$$P_1 = \frac{e_{\text{В}} - 1100}{R_{\text{П1}}} = \frac{1368 - 1100}{11,5} = 23,3 \text{ мг/(м}^2\text{·ч·Па)}. \quad (6)$$

Количество водяного пара, уходящего из стены от левой границы зоны конденсации в стене с экструдированным пенополистиролом (рис. 3, *б*) [1]:

$$P_2 = \frac{810 - e_{\text{Н}}}{R'_{\text{П2}}} = \frac{810 - 11,1}{2,51} = 318,3 \text{ мг/(м}^2\text{·ч·Па)},$$

где $R'_{\text{П2}} = \frac{\delta'_2}{\mu_2} = \frac{0,276}{0,11} = 2,51$ м^2·ч·Па/мг.

И так же, как и в предыдущем варианте, $P_1 < P_2$. Отсюда можно сделать вывод, что конденсат свободно покидает толщу стены, не успевая накопить критическое количество водяного пара. Однако стоит заметить, что, как и в предыдущем варианте, зона накопления конденсата находится в зоне с отрицательными температурами, что может привести к образованию наледи, но говорить об этом стоит только после проведения подобного расчета при нестационарном тепловом потоке и при более глубоком анализе.

Проанализировав различные конструкции стен с разными утеплителями, можно сделать вывод, что самым неблагоприятным с точки зрения образования конденсата в толще стены является конструкция стены с утеплением изнутри независимо от вида утеплителя. Обусловлено это отрицательными температурами в толще стены вплоть до плоскости утеплителя.

Библиографический список

1. *Фокин, К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под. ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина // изд. 5-е, пересмотр. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
2. *Куприянов, В.Н.* Паропроницаемость и проктирование ограждающих конструкций / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 385–390.
3. *Куприянов, В.Н.* К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин, А.Г. Хабибулина // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 504–507.

References

1. *Fokin K.F.* Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdanii [Construction heat engineering of exterior walls of buildings]. Editors Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin. Moscow : ABOK Association Publ., 2006. 256 p. (rus)
2. *Kuprijanov V.N., Safin I.Sh*. Paropronicaemost' i proektirovanie ograzhdajushhih konstrukcij [Vapor permeability and design of protecting designs]. *Academia. Architecture and construction*. 2010. No. 3. Pp. 385–390. (rus)
3. *Kuprijanov V.N., Safin I.Sh*., *Habibulina A.G.* K voprosu o paropronicaemosti ograzhdajushhih konstrukcij [Towards vapor permeability of exterior wall design]. *Academia. Architecture and construction*. 2009. No. 5. Pp. 504–507. (rus)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК: 669.24’ 783:539.389.1

АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
abzaev@tsuab.ru
САРКИСОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
yu-s-sarkisov@yandex.ru
ГОРЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
gorlen52@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2
АФАНАСЬЕВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,
a.dmitri.86@gmail.com
Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
КЛОПОТОВ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
профессор,
klopotovaa@sibmail.com
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная,2,
Томский государственный университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
КЛОПОТОВ ВЛАДИМИР ДМИТРИЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
vklopotov@mail2000.ru
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, ул. Ленина, 30

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ МОНОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ*

В работе приведены результаты анализа количественного рентгеноструктурного анализа минерала CA на основе метода Ритвельда. Установлено, что модельный моноалюминат кальция $CaOAl_2O_3$, является высокостабильной фазой, энергия смешения которой равна –16214,10 эВ. На основе расчетов из первых принципов и уточнения параметров методом Ритвельда определено структурное состояние $CaOAl_2O_3$. Представлено распре-

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта «Программы повышения конкурентоспособности ТГУ».

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта Министерством образования и науки РФ.

деление 118 атомов в моделируемой элементарной ячейке. Показано, что, по крайней мере, часть аморфной фазы находится в микрокристаллическом состоянии. Соотношение аморфной и кристаллической фаз определяет активность моноалюмината кальция.

Методом структурного моделирования показано, что только строго определенные соотношения между кристаллической и аморфной фазами определяют стабильность к существованию различных форм алюминатов кальция.

Ключевые слова: цементный минерал; метод Ритвельда; параметры решетки; кристаллическое строение; моделирование аморфной фазы; энергия смешения; моноалюминат кальция $CaOAl_2O_3$.

YURII A. ABZAEV, DSc, Professor,
abzaev@tsuab.ru
YURII S. SARKISOV, DSc, Professor,
yu-s-sarkisov@yandex.ru
NIKOLAY P. GORLENKO, DSc, Professor,
gorlen52@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia
DMITRIY A. AFANASEV, Research Assistant,
a.dmitri.86@gmail.com
Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, 634050, Tomsk, Russia
ANATOLIIY A. KLOPOTOV, DSc, Professor,
klopotovaa@sibmail.com
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia
Tomsk State University,
36 Lenin Avenue, 634050, Tomsk, Russia
VLADIMIR D. KLOPOTOV, PhD, A/Professor,
vklopotov@mail2000.ru
Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia

THE QUANTITATIVE PHASE ANALYSIS OF CALCIUM MONO-ALUMINATE

The paper presents results of the Rietveld refinement method in X-ray diffraction quantitative phase analysis of calcium mono-aluminate, the mineral. It has been stated that the theoretical calcium mono-aluminate $CaO{\cdot}Al_2O_3$ is a high-stable phase, mixing energy of which is equal to 16214,10 eV. *Ab-initio* calculations and Rietveld refinement method were used to identify the structural state of $CaO{\cdot}Al_2O_3$. It is assumed that at least some fraction of the amorphous phase is converted to the microcrystalline state. *Ab initio* calculations were performed for mixing energy to determine a phase stability of the system $CaO{\cdot}Al_2O_3$.

Keywords: Rietveld refinement method; lattice parameters; crystallinity; amorphous phase; mixing energy.

Введение

В работе проведен количественный фазовый анализ минерала CA, который входит в состав портландцементного клинкера [1, 2, 4]. В виде оксидов химическая формула минерала CA может быть записана как соединение $CaOAl_2O_3$. Для исследуемого минерала на момент постановки задачи исследования был известен только весовой состав. Кристаллическое структурно-фазовое состояние портландцемента является сложным, и это находит отражение на рентгеновских дифрактограммах. Дифрактограмма насыщена перекрывающимися рефлексами основных соединений со сложным структурным соединением [2, 3]. Существенную долю в портландцементе составляет аморфная фаза. В литературе отсутствуют систематические рентгеноструктурные исследования структурного состояния как аморфной, так и кристаллической фаз моноалюмината кальция.

Настоящая работа является продолжением исследования минерала CA дифракционным методом [4]. Ранее было установлено, что соединение $CaOAl_2O_3$ составляет основную долю в минерале CA, а её вклад в интегральную интенсивность составляет величину порядка ~ 83 %. Попытки более точного определения фазового содержания в минерале CA на основе эталонных соединений из рентгеноструктурных баз данных оказались не достаточно корректными.

Целью настоящей работы является детальный анализ структурно-фазового состояния минерала CA (прежде всего, это количественный фазовый анализ методом Ритвельда с использованием как эталонных соединений из рентгеноструктурных баз данных, так и модельного соединения $CaOAl_2O_3$), определение и уточнение структурных параметров соединений [3–5], содержащихся в минерале CA.

Моделирование аморфно-кристаллической фазы

Эталонные фазы, используемые при дифракционном анализе в работе [4], не позволили установить точный количественный состав и содержание отдельных фаз в минерале CA. Это свидетельствует о том, что список эталонов в базе COD [6] оказался недостаточным. Представляется актуальным модельное конструирование соединения на основе $CaOAl_2O_3$. Основываясь на анализе дифракционной картины минерала CA, можно также предположить, что в веществе присутствует аморфная фаза [1]. Для аморфной фазы характерно сохранение ближнего порядка в структурной организации атомов, но при этом отсутствует трансляционная симметрия. При идентификации аморфной фазы в исследуемом минерале полезным является определение ее доли, молекулярного строения, углового интервала, где вклад отраженного рентгеновского излучения в интегральную интенсивность (рентгеновское гало) оказывается наибольшим. Существенная часть из перечисленных задач рассмотрена ранее [4].

В работе предполагается, что, по крайней мере, часть аморфной фазы может находиться в микрокристаллическом состоянии. При этом элементный состав фазы и структурное состояние должны быть одинаковыми. Дифракционный анализ минерала CA показал, что существенный вклад в интегральную

интенсивность вносится соединением $CaOAl_2O_3$ (карточка № 96-900-2487 в базе данных COD [6]). Для указанного соединения $CaOAl_2O_3$ методом Ритвельда было уточнено его структурное состояние: пространственная группа и класс, параметры элементарной ячейки, относительные координаты атомов. На рис. 1, *а* приведено исходное пространственное распределение атомов.

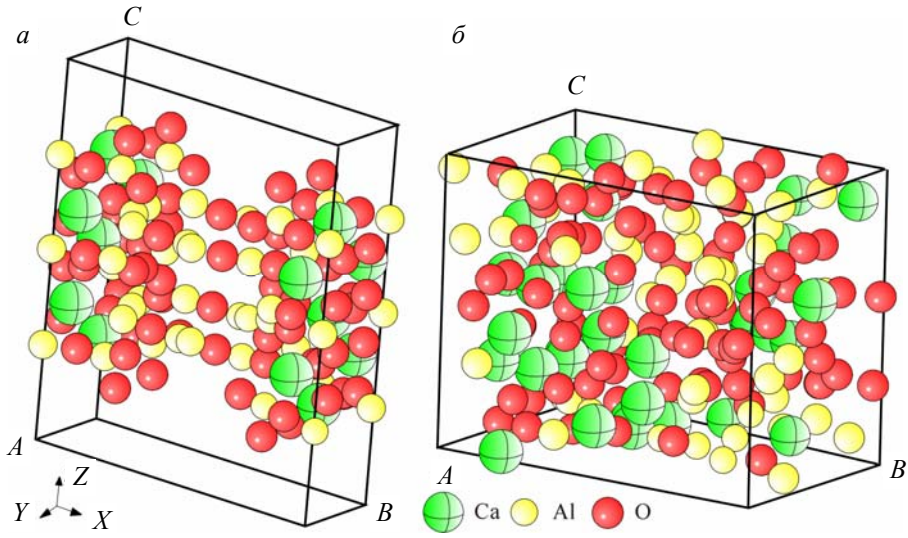


Рис. 1. Пространственное распределение атомов в моделируемой элементарной ячейке: *а* – исходное состояние; *б* – ячейка после моделирования и уточнения позиций атомов методом Ритвельда. В ячейках 188 атомов

Моделирование соединения $CaOAl_2O_3$ представляет собой последовательность нескольких процедур. В качестве основы моделируемого соединения использовался моноалюминат кальция, описанный в работах [4, 5]. Вклад этого соединения в интегральную интенсивность рефлексов является доминирующим.

На первоначальном этапе, при расчете в рамках молекулярной динамики, соединение $CaOAl_2O_3$ было переведено из исходной кристаллической структуры в аморфное состояние [4, 5, 9]. При таком расположении атомов в соединении $CaOAl_2O_3$ должно происходить минимизация внутренней энергии системы. И затем это оптимизированное состояние переводится кристаллическое. Перевод в кристаллическое состояние означает, что оно может быть описано при помощи соответствующих кристаллогеометрических параметров: пространственной группы, параметров элементарной ячейки и координат атомов внутри элементарной ячейки. При этом полученная в результате моделирования структура должна соответствовать условиями стабильного состояния.

На следующем этапе, в результате расчета методом полнопрофильного анализа структурно-фазового состояния минерала CA, проводится сравнение модельного и экспериментального спектров дифрактограмм. Разность между модельным и экспериментальным спектрами дифрактограмм должна быть минимальной.

Таким образом, в результате из исходного структурного состояния в соединении $CaOAl_2O_3$ должны быть удалены признаки кристалличности. Однако в этом соединении должны быть сохранены взаимные расстояния между атомами, которые соответствуют расстояниям в исходной фазе, находящейся в кристаллическом состоянии, как это представлено на карточке № 96-900-2487 из рентгеновской базы данных (табл. 1).

Таблица 1

Список первичных фаз для определения содержания минерала СА

Номера карточек из базы COD	*a,* нм	*b,* нм	*c,* нм	α, °	β, °	γ, °	Простр. группа
96-900-2487-Am.	1,8703	2,0636	1,8343	97,50	94,77	96,46	*P*1
96-900-2487	0,5300	1,7761	2,1089	90,00	90,00	90,00	*Pmmm*
00-005-0355	0,4425	0,9465	0,30782	90,00	90,00	90,00	*Pmmm*
96-200-2889	0,8721	0,8106	1,5109	90,00	90,3093	90,00	*P*2/*m*
96-210-2959	1,2238	1,2238	1,2238	90,00	90,00	90,00	$I\bar{4}\,3d$
96-900-2333	0,9218	0,9223	0,27664	90,00	90,00	90,00	*Cmcm*
96-900-2487	0,5224	1,7846	2,1230	90,00	90,00	90,00	*Pmmm*
96-900-6737-	0,5012	0,5012	0,5012	90,00	90,00	90,00	$Fm\bar{3}$ m
96-900-6835	3,5104	3,5104	4,6294	90,00	90,00	120,00	$P\bar{3}\,m1$
96-900-9681	0,4747	0,4747	1,2954	90,00	90,00	120,00	$R\bar{3}$ c

В результате полученная после оптимизации в расположении атомов конфигурация содержит 188 атомов. Столько же атомов содержал комплекс в исходном состоянии. Моделирование аморфного структурного состояния и расчеты энергии осуществлялись в рамках молекулярной динамики с помощью программы Amorphous. Аморфная фаза конструировалась в универсальном силовом поле методом модифицированного суммирования Эвальда [3]. Описание используемого программного комплекса приведено в работах [4, 5]. Начальные скорости движения атомов выбирались из распределения Больцмана. Скорость атомов в выбранном модельном комплексе соответствовала температуре 298 К. Расчеты конечной конфигурации атомов в молекуле осуществлялись в рамках микроканонического ансамбля *NVT* (*N* – постоянное число атомов, *V* – постоянный объем, *T* – постоянная температура). Сходимость по энергии составляла $2{,}0\cdot10^{-5}$ ккал/моль. На предварительном этапе (расчет в рамках молекулярно-кинетической динамики) проводили распределение атомов с учетом минимизации полной энергии в выбранном модельном комплексе в зависимости от объемной плотности атомов комплекса. Плотность атомов комплекса выбиралась из области значений от 1,5 до 3,0 г/см^2 с шагом 0,1 г/см^2. Заданная плотность соответствовала объему, который был представлен в виде кубиче-

ского ящика. В этом выделенном ящике находилось 188 атомов. Было установлено, что наименьшей энергией E = –293,423 ккал/моль обладает комплекс с плотностью, равной 2,45 г/см^2. При всех расчетах, с учетом аморфного расположения атомов в этом комплексе, был использован критерий минимизации по энергии. Минимальное значение энергии соответствует оптимизированной конфигурации комплекса.

На следующем этапе выделенному комплексу были присвоены признаки кристаллического состояния. Известная объемная плотность атомов определила выбор параметров решетки. Решетке была присвоена пространственная группа P1 с триклинным классом. Были сохранены взаимные расстояния между атомами в решетке. Модельным пространственным распределением атомов с указанными кристаллическими свойствами является соединение $CaOAl_2O_3$. Кристаллическая решетка этого соединения приведена на рис. 1, *б*. Относительные координаты атомов в соединении $CaOAl_2O_3$ приведены в табл. 4 (фаза 96-900-2487-Am). Полученное соединение $CaOAl_2O_3$ относится к сплавам с возможным квазистабильным состоянием. Об этом свидетельствует как высокая степень вышеуказанной сходимости по энергии, так и значение отрицательной энергии молекулы.

С целью определения фазовой стабильности соединения $CaOAl_2O_3$ (96-900-2487-Am) была проведена оценка энергии смешения на основе расчетов из первых принципов. Структурное состояние моделируемого соединения $CaOAl_2O_3$ полностью определяет входные данные для расчетов энергии и геометрической оптимизации в распределении атомов при расчете с использованием программы [7].

Энергия смешения вычисляется по следующей формуле:

$$E_c = E_t - \left(xE_{\mathrm{Ca}} + yE_{\mathrm{O_2}} + zE_{\mathrm{Al}} \right), \qquad (1)$$

где E_t – полная энергия соединения $CaOAl_2O_3$; x, y, z – относительное число атомов $CaOAl_2O_3$; E_{Ca}, $E_{\mathrm{O_2}}$, E_{Al} – полные энергии чистых элементов Ca, Al и молекулы O_2. Расчет энергии смешения соединения $CaOAl_2O_3$ и чистых элементов производился в основном состоянии (при температуре 0 K) в формализме теории функционала плотности (*DFT*). Использовался стандартный псевдопотенциал локальной электронной плотности (*LDA*) для соединения $CaOAl_2O_3$ и для чистых элементов Ca, Al, O, в которых учитывается обменная и корреляционная энергия электронов. Волновые функции валентных электронов исследуемых структур анализировались в базисе плоских волн с радиусом обрезания кинетической энергии при 300 эВ. Для расчетов полной энергии чистых компонентов Ca, Al, O использовались решетки атомов из базы структурных данных COD [6]. Для твердого раствора и чистых элементов производилась геометрическая оптимизация. Структурные параметры соответствовали минимуму полной энергии решеток.

Результаты расчетов энергии смешения соединения $CaOAl_2O_3$ и чистых компонентов Ca, Al и молекулы O_2 приведены в табл. 2, в которой представлены также параметры решеток и пространственная группа соединений, число атомов в решетках чистых элементов и соединения.

Таблица 2

Энергия смешения соединения $CaOAl_2O_3$, элементов Ca, Al и молекулы O_2

Фазы / простр. группа	Энергия решетки (эВ)	Число атомов	*a*, нм	*b*, нм	c, нм	α,°	β,°	γ,°
$CaOAl_2O_3$/ *P*1	–79037,71	188	1,8703	2,0636	1,8343	97,50	94,77	96,46
Ca/ *P*6/*mmm*	–976,82	4	0,3980	0,3980	0,6520	90^O	90	120
Al/ $Pm\bar{m}m$	–229,28	14	0,4050	0,4050	0,4050	90	90	90
O_2/ *P*6/*mmm*	–6238,63	56	0,6780	0,6780	0,6780	90	90	90

Из анализа представленных результатов следует, что относительное число атомов чистых элементов равно: $x = (32/4)$, $y = (104/56)$; $z = (52/14)$. После подстановки полной энергии твердого раствора $CaOAl_2O_3$ и чистых компонентов Ca, Al, O_2 в формулу (1) энергия смешения твердого раствора $CaOAl_2O_3$ оказалась равной $E_c = –16\,214{,}1$ эВ. Энергия смешения значительно меньше нуля. Полученное отрицательное значение энергии свидетельствует о том, что соединение $CaOAl_2O_3$ является высокостабильной фазой. Можно также предположить, что могут существовать фазы $CaOAl_2O_3$ менее стабильные, т. е. с более высокими, но отрицательными значениями энергии смешения. О существовании разных модификаций соединения $CaOAl_2O_3$ указывают и эталонные фазы моноалюмината кальция $CaOAl_2O_3$, приведенные в базе структурных данных COD (см. табл. 1) [6]. Существование разных модификаций одного и того же вещества приводит к существенному осложнению количественного рентгенофазового анализа. Структурные параметры модельного соединения $CaOAl_2O_3$ и данные от эталонных соединений из рентгеновской базы данных COD (см. табл. 1) были использованы для оценки количественного содержания фаз минерала СА.

Количественный фазовый анализ

В работе проведено исследование фазового состава минерала СА. На момент постановки задачи исследования отсутствовали сведения о пространственной группе, параметрах кристаллических решеток фаз минерала СА, аморфной составляющей и ее внутреннем молекулярном строении. Рентгеноструктурные исследования порошка минерала СА проводились на дифрактометре ДРОН4-07, который был модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съемки производились на медном CuK_α излучении по схеме Брегга – Брентано с шагом 0,020 и временем экспозиции в каждой точке, равной 1 с, в угловом диапазоне 2θ от 190 до 820.

На рис. 2 приведены графики экспериментальной и теоретической дифрактограмм минерала СА.

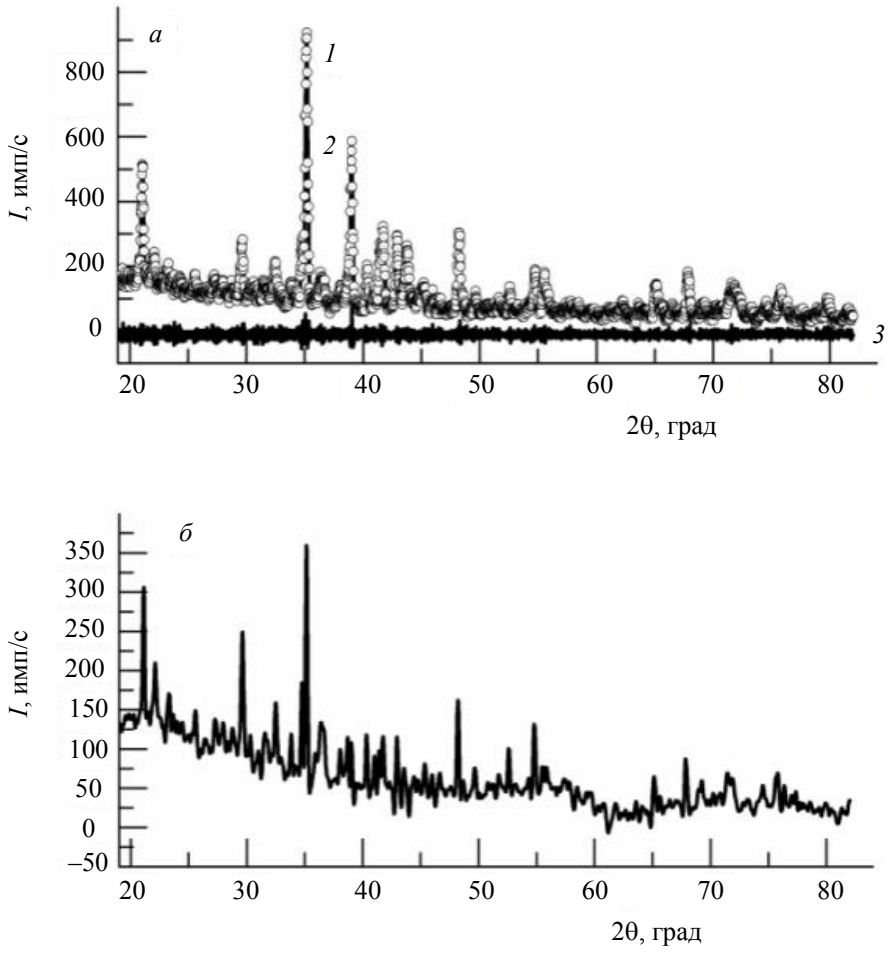


Рис. 2. Дифрактограммы моноалюмината кальция CA:
а – экспериментальная дифрактограмма (*1*), расчетная (*2*) и разность между экспериментальной и расчетной дифрактограммами (*3*); *б* – дифрактограмма, содержащая аморфную фазу и кристаллические соединения (96-900-2487-$Al_6Ca_4O_{13}$ (2) – Temp)

Для построения теоретических дифрактограмм использовались структурные данные эталонных соединений из базы данных COD [6] (см. табл. 1). Как видно на рис. 2, экспериментальная дифрактограмма имеет сложный спектр, создаваемый кристаллическими соединениями и аморфной фазой.

На основе структурных данных эталонных соединений из базы данных (см. табл. 1), а также модельного соединения $CaOAl_2O_3$ был проведен количественный рентгенофазовый анализ моноалюмината кальция CA. Применялся метод Ритвельда, при помощи которого были уточнены структурные параметры отдельных соединений [2–4, 8]. Для этого было использовано полнопрофильное уточнение разности между расчетной $I_{\text{расч}}(2\theta)$ интенсивностью структурных линий каждого соединения и экспериментальной $I_{\text{эксп}}(2\theta_i)$

(рис. 2). В соответствии с выбранной стратегией в работе были проведены сравнение и уточнение структурных, профильных, инструментальных параметров, входящих в теоретическую интенсивность, которые осуществляются нелинейным методом наименьших квадратов [5]. Была достигнута хорошая степень сходимости в разности между расчетными значениями рентгеновских спектров от соединений и экспериментальной рентгенограммой, полученной от минерала СА (рис. 2, *а*). Относительная разность интенсивностей оказалась равной R_{wp} = 8,93 %. Объясненная доля суммарной интенсивности исследуемых фаз, которые представлены в табл. 3, составляет 99,6 % от экспериментальной.

Таблица 3

Вклады расчетных интенсивностей эталонных соединений из базы данных COD в интегральную интенсивность рентгеновского спектра на дифрактограмме

№ п/п	Номера карточек из базы COD	Хим. формула	Интенсивность, %	Весовая доля, %
2	96-200-2889	Al_2CaO_4	9,447	13,29
3	96-210-2959	$O_{65.80}Al_{28}Ca_{24}$	0,53	0,76
4	96-900-2333	Fe_3O_4	2,46	1,44
5	96-900-2487-Am	$Al_6Ca_4O_{13}$	83,16	76,96
6	96-900-2487	$Al_6Ca_4O_{13}$	3,99	7,00

Параметры элементарной ячейки соединения $CaOAl_2O_3$ приведены в табл. 1. При количественном фазовом анализе методом Ритвельда уточнение параметров решеток и относительных координат атомов эталонных решеток производилось раздельно для каждых фаз (табл. 3). С высокой степенью надежности установлено, что в минерале СА основным соединением является моноалюминат кальция $CaOAl_2O_3$, его доля составляет 97,13 %. В минерале СА в незначительной степени присутствуют также окислы железа Fe_3O_4 (2,46 %) и кальция. Методом Ритвельда установлено, что соединение моноалюмината кальция $CaOAl_2O_3$ может состоять из разных кристаллографических модификаций. Объёмная доля от каждой модификации разная. Показано, что в минерале СА доминирующей модификацией является высокостабильное соединение $CaOAl_2O_3$ (96-900-2487-Am). Для этого соединения $CaOAl_2O_3$ в табл. 1 и 4 приведены структурные параметры, а также относительные координаты атомов.

Приведенные в табл. 4 данные представляют собой интерес для расчетов и моделирования структурных соединений и других видов алюминатов, не рассмотренных в данной работе.

Таблица 4

Относительные координаты атомов твердого раствора фазы 96-900-2487-Am (табл. 1)

Элемент	*x*	*y*	*z*	Элемент	*x*	*y*	*z*
Al1	0,01867	0,80685	0,5339	O59	0,45976	1,22356	1,03335
Al2	0,32181	1,31041	0,63586	O60	0,27689	1,01807	0,7266

Продолжение табл. 4

Элемент	*x*	*y*	*z*	Элемент	*x*	*y*	*z*
Al3	0,87043	0,05987	1,27381	O61	0,41908	0,79153	0,63893
Al4	1,22163	0,51303	1,37164	Ca62	0,66839	0,27186	1,31008
Al5	0,21108	1,34852	0,84919	O63	1,1196	0,22055	1,49567
Al6	0,79395	0,69339	1,79205	O64	0,87766	0,26427	1,57413
Al7	–0,06395	1,0012	0,94794	O65	0,92076	0,51933	1,52305
Al8	0,71398	0,26705	1,68957	O66	1,04457	0,44514	1,42711
Al9	0,53877	0,7577	0,11506	Ca67	0,22861	0,694	0,44698
Al10	1,13377	–0,03909	1,09923	O68	0,10622	1,05434	0,43768
Al11	0,52535	1,13969	0,1982	O69	0,28002	0,8085	0,30529
Al12	1,44181	0,38762	0,95984	O70	0,53253	1,21064	0,39382
Al13	0,67248	0,67881	1,28754	O71	0,26907	1,03119	0,5031
Al14	0,29504	0,91976	0,94832	Al72	1,05593	0,16443	0,83185
Al15	0,97894	0,38067	0,74822	Al73	0,84036	0,30386	1,08013
Al16	0,69151	0,99244	0,45214	Ca74	1,19253	0,65741	1,25666
Al17	0,6182	0,72778	0,61595	Ca75	0,94158	0,47262	1,16098
Al18	1,05084	0,45273	0,98418	Ca76	1,25796	0,43091	1,05835
Al19	0,35967	0,94395	1,19032	O77	1,03002	0,33843	0,55179
Al20	0,54833	0,39521	1,40286	O78	0,7805	0,38563	1,25868
Al21	0,60382	0,24128	0,88959	O79	0,98959	0,68721	0,8185
Al22	0,76457	0,47258	0,78381	O80	1,12042	0,49235	1,18517
Al23	0,91288	0,87923	1,1248	O81	0,8518	0,46279	0,98303
Al24	0,9727	0,8481	0,76425	Al82	0,72149	0,87802	0,24195
Al25	0,53682	0,38074	0,75131	Al83	0,65252	1,05655	0,69017
Al26	0,59245	0,5854	0,84782	Ca84	0,07798	0,72069	0,35948
Al27	0,88163	1,01966	0,69806	Ca85	0,37733	0,79896	0,46203
Al28	0,73867	0,90108	0,81914	Ca86	0,55576	0,94432	0,15731
Al29	0,45094	0,45348	1,19626	O87	0,67707	0,81123	0,44693
Al30	0,61368	0,55823	1,07767	O88	0,59889	0,75639	0,81258
Al31	0,7193	0,98857	1,05382	O89	0,60335	0,57999	0,43512
Al32	0,7186	0,77406	0,99387	O90	0,36471	0,95008	0,40175
Al33	0,36319	0,51246	0,79237	O91	0,61207	1,02977	0,8761
Al34	0,39008	0,58646	1,03515	Ca92	1,18896	0,59139	1,0812
Al35	0,79563	1,13983	0,89104	O93	1,27182	0,23741	1,28493
Al36	0,51984	0,87756	0,93184	O94	1,43353	0,28169	1,24622
Ca37	0,30597	1,22516	0,93779	O95	1,138	0,20512	1,16338
O38	0,15902	1,10833	0,61114	O96	0,97612	0,22237	1,20717
O39	0,12001	1,26263	0,67178	Al97	0,5099	0,85543	0,3303
O40	0,01982	0,99328	0,56678	Al98	0,26137	0,58547	0,6043
O41	0,17245	0,93843	0,59545	Ca99	0,42709	1,13549	0,49811
Al42	0,7496	0,56957	1,5846	Ca100	0,50367	1,00391	0,5199
Al43	0,89401	0,77241	1,31398	Ca101	0,67165	1,05257	0,26591
Ca44	0,9466	0,20197	1,42642	O102	0,47738	0,63392	0,24016
Ca45	0,74946	0,42123	1,43444	O103	0,46147	0,69602	0,90549
Ca46	0,65192	0,40527	1,59339	O104	0,84497	0,88931	0,50217
O47	0,81673	0,79172	1,63113	O105	0,51831	1,04315	0,35616
O48	0,9051	0,70752	0,98463	O106	0,54149	0,8632	0,54106

Продолжение табл. 4

Элемент	*x*	*y*	*z*	Элемент	*x*	*y*	*z*
O49	0,34358	0,38487	1,3354	Ca107	0,98969	0,19501	1,02393
O50	0,89253	0,35046	1,43677	O108	1,07014	0,15359	1,31946
O51	0,76564	0,56575	1,38864	O109	1,20331	0,08659	1,26087
Al52	0,19486	0,7738	1,10218	O110	1,21397	0,36776	1,20487
Al53	0,30637	0,74246	0,79071	O111	1,11857	0,31468	1,3332
Ca54	0,24278	1,17899	0,76461	Ca112	0,60942	1,14666	0,52636
Ca55	0,45383	1,03017	0,68446	O113	0,257	1,16445	0,43673
Ca56	0,22345	1,07614	0,88456	O114	0,37224	1,11485	0,31787
O57	0,04785	0,99077	1,27108	O115	0,35729	0,66513	0,34565
O58	0,45889	0,66744	0,72081	O116	0,19976	0,85057	0,44673
Al117	1,12356	0,57291	0,7861	O158	0,93131	0,67603	1,62897
Al118	1,00413	0,65109	1,14923	O159	0,01288	0,83066	0,96529
Ca119	1,00884	0,0808	1,14029	O160	0,32828	1,30298	1,1045
Ca120	0,8361	0,2443	1,28872	O161	1,11686	0,1069	1,00687
Ca121	1,15878	0,27246	1,01487	O162	1,22633	0,5154	0,92954
O122	1,18266	0,42373	0,67756	O163	0,3018	0,55323	0,20383
O123	0,80144	0,68091	1,13005	O164	0,75998	1,16005	0,40686
O124	0,88801	0,20641	0,7358	O165	0,71741	0,1718	1,16046
O125	1,04895	0,33909	1,12757	O166	0,40796	1,24616	0,80226
O126	0,76695	0,4707	1,12395	O167	1,03998	0,5638	1,31738
Al127	0,3053	1,11909	1,0915	O168	0,06708	0,49524	0,59705
Al128	0,42464	1,08746	0,87754	O169	0,51762	1,18612	0,68519
Ca129	0,10614	0,72304	0,69157	O170	0,85682	0,12793	1,09267
Ca130	0,34499	0,91886	0,58121	O171	0,23472	0,78692	0,60309
Ca131	0,11039	0,9512	0,89455	O172	1,07531	0,83379	1,24734
O132	0,20455	0,94797	1,31947	O173	0,79042	0,32735	0,88225
O133	0,54892	0,89492	0,72553	O174	0,93399	0,56052	0,88582
O134	0,36001	0,72299	1,18927	O175	0,35031	0,43658	0,50445
O135	0,18585	0,87668	0,75277	O176	0,71235	0,89884	0,61264
O136	0,3853	0,91178	0,76874	O177	0,6523	0,48768	1,26349
Ca137	0,93134	0,63927	1,42557	O178	0,96502	0,93983	1,39653
O138	1,18602	0,38171	1,50146	O179	0,36818	0,77888	1,01765
O139	0,92752	0,54636	1,70283	O180	0,60235	1,12334	1,02104
O140	0,70006	0,28292	1,48865	O181	0,79424	0,7138	1,47342
O141	0,9649	0,36666	1,2741	O182	0,24442	0,66729	0,94459
Ca142	0,1408	0,7797	0,88154	O183	0,94631	0,29063	0,909
O143	–0,01021	1,15443	0,60627	O184	0,89094	1,05449	0,47979
O144	–0,20934	1,13098	0,58099	O185	0,41821	0,66012	0,52477
O145	0,09639	1,00505	0,73458	O186	1,07266	0,65236	0,96585
O146	0,34624	1,13379	0,64443	O187	0,46215	1,01592	1,04493
Al147	0,51344	0,52616	1,60639	O188	0,38638	0,27889	1,43932
Al148	0,61598	0,3319	1,12403	O179	0,36818	0,77888	1,01765
Ca149	1,08435	0,63156	1,51802	O180	0,60235	1,12334	1,02104
Ca150	0,84702	0,58732	1,2481	O181	0,79424	0,7138	1,47342
Ca151	0,82902	0,40702	1,60056	O182	0,24442	0,66729	0,94459
O152	0,43102	0,53854	1,3946	O183	0,94631	0,29063	0,909

Окончание табл. 4

Элемент	*x*	*y*	*z*	Элемент	*x*	*y*	*z*
O153	0,77326	0,59171	0,96522	O184	0,89094	1,05449	0,47979
O154	0,52629	0,70636	1,41705	O185	0,41821	0,66012	0,52477
O155	0,8963	0,48461	1,35264	O186	1,07266	0,65236	0,96585
O156	0,66215	0,42284	0,94348	O187	0,46215	1,01592	1,04493
O157	0,52294	0,2834	1,5608	O188	0,38638	0,27889	1,43932

Приведенные в табл. 4 данные представляют собой интерес для расчетов и моделирования структурных соединений и других видов алюминатов, не рассмотренных в данной работе.

Заключение

В работе проведен детальный анализ количественного содержания соединений в минерале CA на основе метода Ритвельда. Доля объясненной интегральной интенсивности на теоретической дифрактограмме является высокой относительно экспериментальной дифрактограммы и достигает значений 99,6 %. Установлено, что модельное соединение моноалюмината кальция $CaOAl_2O_3$ является очень стабильным с энергией смешения равной –16214,1 эВ. Это соединение вносит основной вклад в интегральную интенсивность на дифрактограмме от минерала CA. Расчеты из первых принципов и уточнение параметров методом Ритвельда позволили определить параметры элементарной ячейки и распределение атомов в соединении $CaOAl_2O_3$.

Библиографический список

1. *Тейлор, Х.* Химия цемента / Х. Тейлор; [пер. с англ.]. – М. : МИР, 1996. – 560 с.
2. *Full phase analyses* of Portland clincer by penetrating synchrotron powder diffraction / A. Torre, A. Cabeza, A. Calventa, S. Bruque, M. Aranda // Anal. Chem. – 2001. – M. 73. – № 2. – P. 151–156.
3. *Основы* рентгеноструктурного анализа в материаловедении / А.А Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потекаев, О.Г. Волокитин. – Томск : ТГАСУ, 2012. – 275 с.
4. *Особенности* структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, М.В. Федорищева, Д.А. Афанасьев, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов // Труды 16 Международной конференции «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». – 2013. – Т. 1. – Ростов-на-Дону ; Туапсе, Россия. – С. 180–183.
5. *Полнопрофильный* рентгеноструктурный анализ клинкерного минерала C4AF / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов, Д.А. Афанасьев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 6. – С. 200–209.
6. Условия доступа : www.crystallography.net
7. *Абзаев, Ю.А.* Первопринципные расчеты концентрационной зависимости упругих параметров в монокристаллах $Ni_3(Ge_{1-x},Al_x)$ / Ю.А. Абзаев, М.Д. Старостенков, А.А. Клопотов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 56–62.
8. *Whitfield, P.S.* Quantitative Rietveld analyses of the amorphous content in cements and clincers / P.S. Whitfield // Journal of Material Science. – 2003. – V. 38. – № 21. – P. 4415–4421.
9. *Dai, W.* Molecular dynamics simulation on structure and characteristics of cement hydration products / W. Dai, P. Hu // Journal of software. – 2011. – V. 6. – № 11. – P. 2184–2188.

REFERENCES

1. *Taylor H*. Cement chemistry. Moscow : Mir, 1996. 560 p. (transl. from Engl.)
2. *Torre* A., *Cabeza A., Calventa A., Bruque S., Aranda M*. Full phase analyses of Portland clinker by penetrating synchrotron powder diffraction. *Anal. Chem*. 2001. No. 2. Pp. 151–156.
3. *Klopotov A.A., Abzaev Yu.A., Potekaev A.I., Volokitin O.G.* Osnovy rentgenostrukturnogo analiza v materialovedenii [Principles of X-ray diffraction analysis in material science]. Tomsk : TSUAB Publishing House. 2012. 275 p. (rus)
4. *Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Fedorishcheva M.V., Afanas'ev D.A., Klopotov A.A., Klopotov V.D.* Osobennosti strukturno-fazovogo sostoyaniya monoalyuminata kal'tsiya [Structural-phase state of calcium monoaluminate]. *Proc. 16th Int. Sci. Conf. 'Poryadok, besporyadok i svoistva oksidov* [Order, disorder, and properties of oxides] 2013. V.1. Rostov-on-Don, Pp. 180–183. (rus)
5. *Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Klopotov A.A., Klopotov V.D., Afanas'ev D.A.* Polnoprofil'nyi rentgenostrukturnyi analiz klinkernogo minerala C4AF [X-ray diffraction analysis of C4AF clinker mineral]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 6. Pp. 200–209. (rus)
6. *Information on* www.crystallography.net
7. *Abzaev Yu.A., Starostenkov M.D., Klopotov A.A*. Pervoprintsipnye raschety kontsentratsionnoi zavisimosti uprugikh parametrov v monokristallakh $Ni_3(Ge_{1-x}, Al_x)$ [*Ab-initio* calculations of concentration dependences of elastic parameters in monocrystals $Ni_3(Ge_{1-x}, Al_x)$]. *Basic Problems of Material Science*. 2014. No. 1. Pp. 56–62. (rus)
8. *Whitfield P.S.* Quantitative Rietveld analyses of the amorphous content in cements and clinkers. *J. Material Science.* 2003. No. 21. Pp. 4415–4421.
9. *Dai W., Hu P.* Molecular dynamics simulation on structure and characteristics of cement hydration products. *Journal of Software*, 2011. No. 11. Pp. 2184–2188.

УДК 622.733:537.064.32

САФРОНОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
v.n.safronov@mail.ru
ГОРЛЕНКО НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
Gorlen52@mail.ru
САРКИСОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
yu-s-sarkisov@yandex.ru
АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
abzaev@tsuab.ru
КУГАЕВСКАЯ СОФЬЯ НИКОЛАЕВНА, ст. преподаватель,
somana@mail.ru
ЕРМИЛОВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА, студентка,
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

РОЛЬ ЦИКЛОВОЙ МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ЗАТВОРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ СВОЙСТВАМИ И ПРОЦЕССАМИ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

В работе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований влияния цикловой магнитной обработки воды затворения портландцемента на процессы гидратации и структурообразования цементных систем и на формирование эксплуатационных характеристик цементного камня. Установлено, что эффективность управления свойствами как отдельных компонентов, так и системы в целом определяется не только собственными свойствами компонентов, но и оптимальными режимами внешнего воздействия.

Ключевые слова: цикловая магнитная обработка; цемент; вода; свойства; цементный камень; кластеры; аморфная фаза; кристаллическая фаза; метод Ритвельда; моделирование; растворимость газов.

VLADIMIR N. SAFRONOV, PhD, A/Professor,
v.n.safronov@mail.ru
NIKOLAI P. GORLENKO, DSc, Professor,
Gorlen52@mail.ru
YURII S. SARKISOV, DSc, Professor,
yu-s-sarkisov@yandex.ru
YURII A. ABZAEV, DSc, Professor,
abzaev@tsuab.ru
SOF''YA N. KUGAEVSKAYA, Senior Lecturer,
somana@mail.ru
TAT''YANA A. ERMILOVA, Student,
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

MIXING WATER MAGNETIC ACTIVATION CYCLE EFFECT ON HYDRATION AND STRUCTURE FORMATION OF CEMENT SYSTEMS

The paper presents experimental results of mixing water magnetic activation effect on hydration processes in and structure formation of cement systems and the functional performance of cement stone. It is stated that the efficient control for properties of both particular components and the entire system are defined not only by individual properties of components but also optimum modes of exposure.

***Keywords**:* magnetic activation cycle; cement; water; properties; cement stone; clusters; amorphous phase; crystalline phase; Rietveld method; modeling; gas solubility.

Создание инновационных технологий при наличии оптимальных энергетических и материальных ресурсов в строительной индустрии сопряжено с расширением фундаментальных и прикладных исследований с получением нового класса строительных материалов – активированных композитов и их компонентов [1]. Последние в значительной степени связываются с развитием электрофизических технологий активации. Среди широкого спектра подобного рода технологий практически важной является цикловая магнитная активация воды затворения, успешно разрабатываемая в Томском государственном архитектурно-строительном университете. Обнадеживающими являются результаты исследований свойств композиций, приготовленных на воде затворения, обработанной по цикловой магнитной активации, керамических матриц [2], матриц на основе сульфатно-кальциевых отходов [3], органоминеральных матриц на основе торфа [4], цементных матриц [5].

В настоящей работе установлены закономерности изменения процессов структурообразования и прочностных свойств твердеющих композиций при использовании различных вяжущих, затворенных на воде, активированной по цикловой технологии, с диапазоном водоцементного отношения 0,35–0,45 для всех принятых в работе типов цементов. Магнитная активация проводилась в устройстве обработки жидких сред с индукцией иона в центре, равной 40 мТл по методике, описанной в работе [5].

В качестве минеральных вяжущих в исследованиях были приняты ПЦ500-Д0, ПЦ400-Д0, ШПЦ400-Д0 (Топкинского завода) и ПЦ400-Д20 завода «Уралцемент». Активация воды затворения осуществлялась циклично в диапазоне 0–25 циклов с шагом 5 циклов. Прочность активированных образцов оценивалась в 28-суточном естественном твердении. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 1–3.

Из приведенных рисунков видно, что зависимости прочности активированных образцов цементного камня от количества циклов активации для всех принятых типов цементов носят волновой характер. Прочность активированных образцов выше прочности образцов контрольной серии. Полученные закономерности различаются ходом кривых прочностных зависимостей.

Волновой характер указывает на то, что в зоне контактов действуют различные явления. Одни способствуют росту прочности, а другие ее снижают.

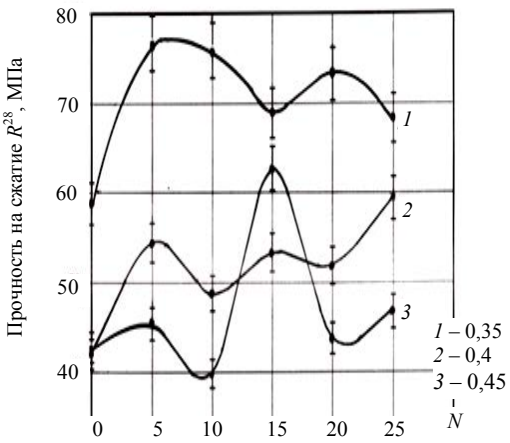


Рис. 1. Зависимость прочности цементного камня на цементе ПЦ500-Д0 от количества циклов активации при различных водоцементных отношениях

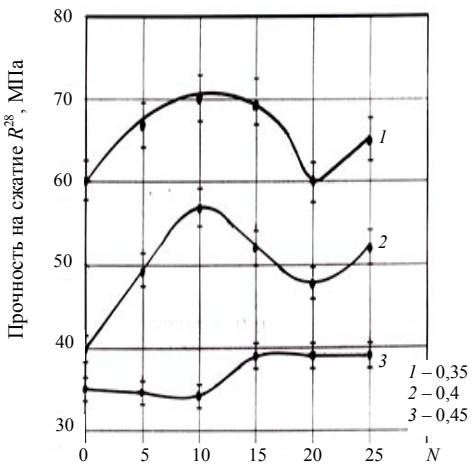


Рис. 2. Зависимость прочности цементного камня на цементе ЩПЦ-400 от количества циклов активации при различных водоцементных отношениях

Из графиков видно, что у каждого примененного цемента есть свой максимум прочности при определенном количестве циклов в принятом интервале цикловой магнитной активации.

Волновой характер изменения прочности активированного цементного камня от количества циклов обработки воды затворения связывается в основном с двумя технологическими факторами:

– увеличение количества циклов обработки воды по принятой технологии цикловой активации приводит к росту кислорода в обрабатываемой воде,

что обеспечивает повышение активности воды затворения, т. к. кислород в воздухе является парамагнитным веществом;

– с ростом количества циклов обработки воды затворения одновременно повышается величина ее поверхностного натяжения, что приводит к снижению процессов смачивания и прилипания жидкой фазы цементного теста и в конечном счете к снижению прочности активированного цементного камня.

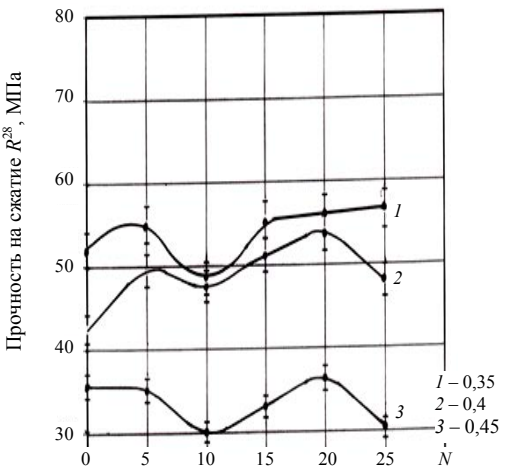


Рис. 3. Зависимость прочности цементного камня на цементе ПЦ400-Д20 от количества циклов активации при различных водоцементных отношениях

Характер изменения указанных факторов в принятом диапазоне цикловой магнитной активации определяет базовое начало течения процессов структурообразования цементного теста и, как следствие, ход зависимостей прочности активированных образцов от количества циклов магнитной обработки. Установленный волновой характер зависимостей хорошо согласуется с пятью основными типами кинетических кривых набора прочности, рассмотренных в работе [6], и с данными работы [7].

Проведены углубленные исследования по влиянию цикловой магнитно активированной воды затворения на прочность и особенности структурообразования цементного камня. В качестве воды затворения принята вода артезианская высшей категории негазированная с активным кислородом (15 мг/л). Содержание основных ионов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание основных ионов в воде, мг/л

Кальций Ca^{2+}	30–50
Магний Mg^{2+}	5–30
Калий K^{+}	2–10
Бикарбонаты HCO_3^{-}	150–300
Кислород O_2	15

Окончание табл. 1

Фторид-ион F^-	0,6–1,2
Общая минерализация 200–400 мг/л Общая жесткость 2,5–5,0 мг-экв/л	

Результаты оценки прочности цементного камня приведены на рис. 4.

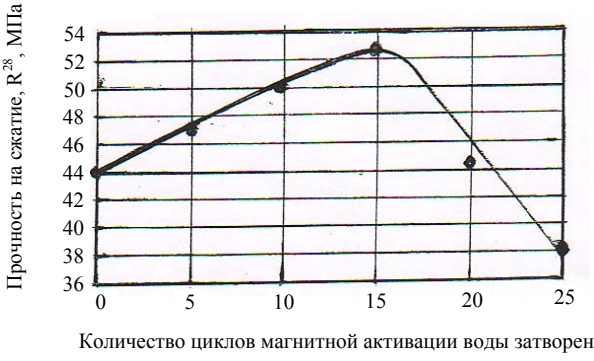


Рис. 4. Зависимость прочности цементного камня от количества циклов магнитной активации воды

Из рис. 4. видно, что полученная зависимость имеет максимальное значение прочности в принятом диапазоне изменения количества циклов магнитной активации воды затворения.

Дальнейшие физические исследования структурообразования цементного камня выполнены при количестве циклов активации 0,15 и 25.

В работе был проведен количественный фазовый анализ цементного камня в исходном состоянии, после 15 и 25 циклов магнитной обработки воды. Время твердения образцов в естественных условиях составляло 28 сут. Описание количественного фазового анализа приведено в работе [8]. Качественная идентификация структур цементного камня производилась с помощью базы кристаллографических данных COD [9]. Теоретические дифрактограммы отдельных фаз, интегральной интенсивности, а также экспериментальная дифрактограмма приведены на рис. 5–7. Как видно из рис. 5–7, экспериментальные дифрактограммы имеют сложный вид, выделяются как интенсивные, так и слабые перекрывающиеся рефлексы кристаллических фаз, в цементном камне присутствует также высокая доля аморфной фазы. При количественном фазовом анализе была достигнута хорошая степень сходимости расчетных интегральных интенсивностей (рис. 5–7, *а*) с экспериментальной. Критерии сходимости оказались равными R_{wp} = 6,46 и R_p = 4,92 % для исходного состояния (рис. 5, *а*), R_{wp} = 8,51 и R_p = 6,55 % для цементного камня с 15 циклами магнитной обработки воды (рис. 6, *а*) и, наконец, R_{wp} = 6,92 и R_p = 5,41 % для цементного камня с 25 циклами магнитной обработки воды (рис. 7, *а*) соответственно. Результаты количественного фазового анализа приведены в табл. 2–4. Анализ показал, что в исход-

ном состоянии цементный камень состоит из фаз [$3CaO{\cdot}SiO_2$], $CaO{\cdot}H_2O$, [$CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$], [$CaO{\cdot}CO_2$], [$4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$]. После 15 циклов магнитной обработки воды (табл. 3) – $6CaO{\cdot}3(Al_2O_3){\cdot}AlO$, $CaO{\cdot}CO_2$, $3CaO{\cdot}SiO_2$. После 25 циклов магнитной обработки воды (табл. 4) – $3CaO{\cdot}SiO_2$, $CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$, $CaO{\cdot}H_2O$, $CaO{\cdot}CO_2$. В табл. 2–4 приведены также уточненные значения параметров решеток фаз.

Результаты количественного фазового состава в цементном камне свидетельствуют о том, что цикловая магнитная активация воды затворения оказывает существенное влияние на твердение (табл. 2–4). Произошло изменение качественного состава фаз в цементном камне, а также относительной доли фаз. В исходном состоянии доминировала фаза $3CaO{\cdot}SiO_2$, которая оказалась основной также в камне после 25 циклов магнитной обработки воды. После 15 циклов магнитной обработки воды доминирующей оказалась промежуточная фаза $6CaO{\cdot}3(Al_2O_3){\cdot}AlO$. Можно полагать, что при 15 циклах магнитной обработки интенсивность кристаллизации $3CaO{\cdot}SiO_2$ существенно уменьшилась, а при 25 циклах, наоборот, возросла за счет снижения интенсивности в исследуемом интервале времени химических реакций, формирующих $CaO{\cdot}H_2O$, $CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$ и $CaO{\cdot}CO_2$, доля которых в интегральной интенсивности снизилась (табл. 2–4). Магнитная обработка воды привела к временному снижению скорости кристаллизации фазы $4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$, которая присутствует только в исходном состоянии. Увеличение циклов магнитной обработки воды оказало различное влияние на характер и последовательность кристаллизации фаз $CaO{\cdot}CO_2$, $CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$. Доля первой фазы возросла при 15 циклах и уменьшилась при 25 циклах. Кристаллизация фазы $CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$ существенно замедлилась при 15 циклах, что способствует, в свою очередь, интенсификации процессов фазообразований других клинкерных минералов портландцементного камня. Как следствие, это привело к достижению максимальной прочности цементного камня.

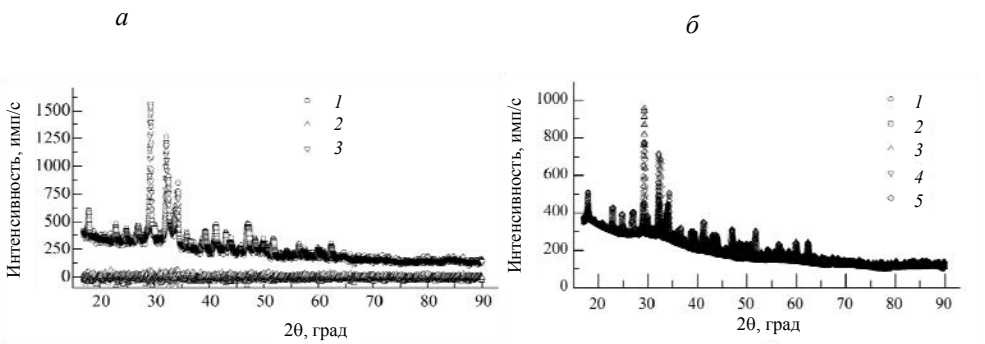


Рис. 5. Количественный фазовый анализ цементного камня в исходном состоянии:
а – дифрактограмма цементного камня: *1* – теоретическая интегральная дифрактограмма; *2* – экспериментальная дифрактограмма; *3* – их разность; *б* – теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *1* – 6[$CaO{\cdot}CO_2$]; *2* – 36[$3CaO{\cdot}SiO_2$]; *3* – 6[$CaO{\cdot}4SiO_{2.5}$]; *4* – $CaO{\cdot}H_2O$; *5* – 2[$4CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$

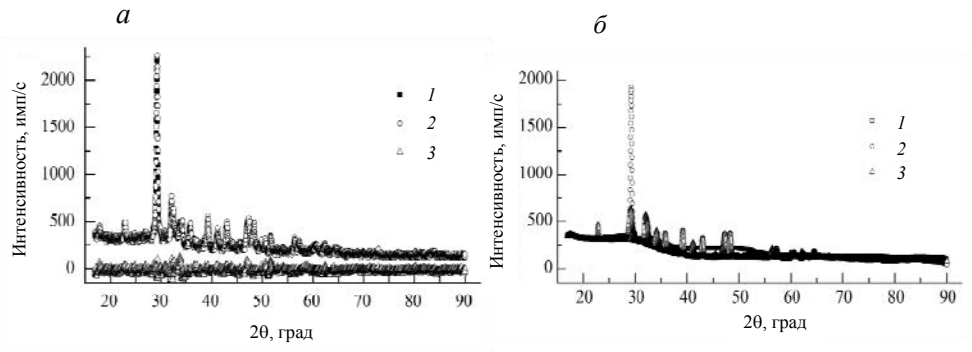


Рис. 6. Фазовый анализ цементного камня при 15 циклах магнитной активации воды затворения:
а – дифрактограмма цементного камня: *1* – теоретическая интегральная дифрактограмма; *2* – экспериментальная дифрактограмма; *3* – их разность; *б* – теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *1–4* [6(CaO)·3(Al_2O_3)·AlO]; *2* – 6[CaO·CO_2]; *3* – 36[3CaO·SiO_2]

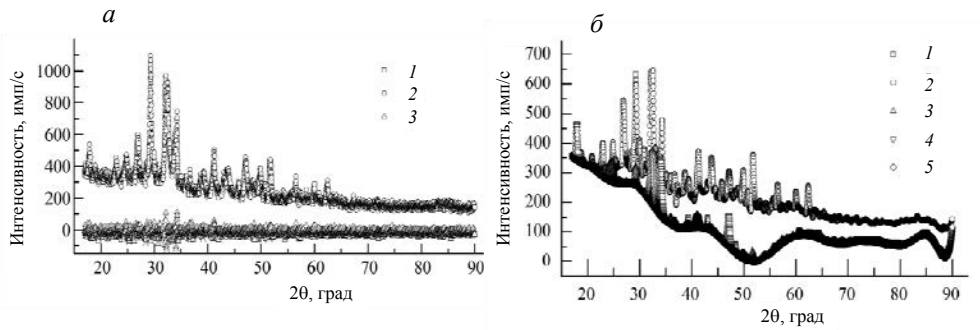


Рис. 7. Фазовый анализ цементного камня при 25 циклах магнитной активации воды затворения:
а – дифрактограмма цементного камня: *1* – теоретическая интегральная дифрактограмма; *2* – экспериментальная дифрактограмма; *3* – их разность; *б* – теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *1* – 6[CaO·CO_2]; *2* – 36[3CaO·SiO_2]; *3* – 6[CaO·4$SiO_{2.5}$]; *4* – CaO·H_2O, *5* – 2[4CaO·Al_2O_3·Fe_2O_3]

Таким образом, можно утверждать, что имеют место кристаллизация фаз различной интенсивности в системе «цемент – вода» и их перераспределение в структуре цементного камня до и после цикловой магнитной обработки воды затворения. При этом моделирование исследуемой системы и проведенные расчеты аморфных и кристаллических фаз методом Ритвельда до и после цикловой магнитной активации показало, что во многом прочность цементного камня определяется не только качественным состоянием этих фаз, но и их количественным соотношением.

Ранее в работе [5] было показано, что свойства воды до и после цикловой магнитной обработки в значительной мере определяются составом и растворимостью различных газов в ней.

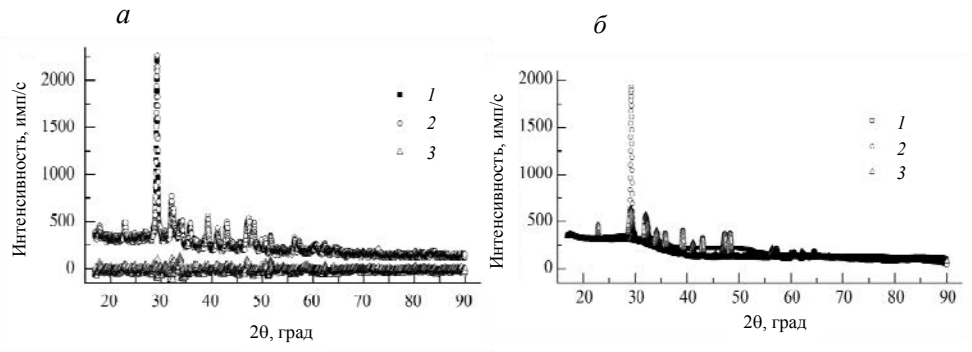


Рис. 6. Фазовый анализ цементного камня при 15 циклах магнитной активации воды затворения:
а – дифрактограмма цементного камня: *1* – теоретическая интегральная дифрактограмма; *2* – экспериментальная дифрактограмма; *3* – их разность; *б* – теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *1–4* [6(CaO)·3(Al_2O_3)·AlO]; *2* – 6[CaO·CO_2]; *3* – 36[3CaO·SiO_2]

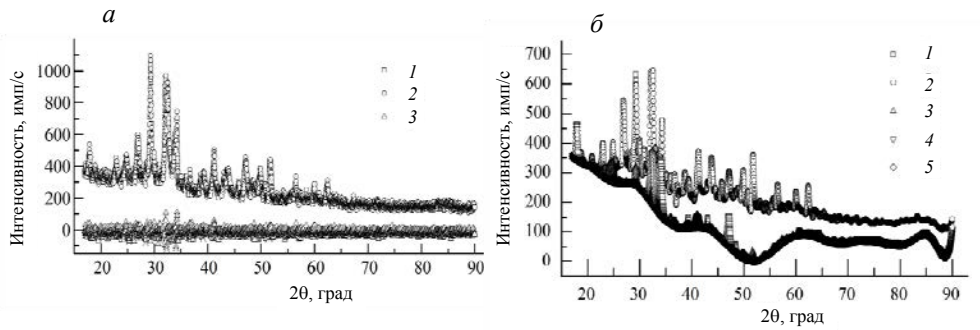


Рис. 7. Фазовый анализ цементного камня при 25 циклах магнитной активации воды затворения:
а – дифрактограмма цементного камня: *1* – теоретическая интегральная дифрактограмма; *2* – экспериментальная дифрактограмма; *3* – их разность; *б* – теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *1* – 6[CaO·CO_2]; *2* – 36[3CaO·SiO_2]; *3* – 6[CaO·4$SiO_{2.5}$]; *4* – CaO·H_2O, *5* – 2[4CaO·Al_2O_3·Fe_2O_3]

Таким образом, можно утверждать, что имеют место кристаллизация фаз различной интенсивности в системе «цемент – вода» и их перераспределение в структуре цементного камня до и после цикловой магнитной обработки воды затворения. При этом моделирование исследуемой системы и проведенные расчеты аморфных и кристаллических фаз методом Ритвельда до и после цикловой магнитной активации показало, что во многом прочность цементного камня определяется не только качественным состоянием этих фаз, но и их количественным соотношением.

Ранее в работе [5] было показано, что свойства воды до и после цикловой магнитной обработки в значительной мере определяются составом и растворимостью различных газов в ней.

Таблица 2

Характеристики цементного камня в исходном состоянии

№ п/п	Номер карточки	Хим. формула фазы	Доля интенсив-ности, %	*a*, нм	*b*, нм	*c*, нм	α	β	γ	Пространств. группа и класс
1	96-900-8367	36[3CaO·SiO_2]	49,64	3,3108	0,7041	1,8510	90°	94°12	90°	Cm, monoclinic
2	96-100-1769	CaO·H_2O	17,02	0,3622673	0,3622673	0,4952329	90°	90°	120°	P-3m1, trigonal
3	96-901-2792	6[CaO·4$SiO_{2.5}$]	15,05	0,5489415	0,6744638	0,9226732	90°	94°22	90°	P2/m, monoclinic
4	96-900-0966	6[CaO·CO_2]	10,90	0,4991104	0,4991104	1,7162658	90°	90°	120°	R-3C, trigonal
5	96-120-0010	2[4CaO·Al_2O_3·Fe_2O_3]	5,89	0,556289	1,4517927	0,5371325	90°	90°	90°	Ima2, orthorhombic

Таблица 3

Характеристики цементного камня после влияния магнитного поля на воду, 15 циклов

№ п/п	Номер карточки	Хим. формула фазы	Доля интенсив-ности, %	*a*, нм	*b*, нм	*c*, нм	α	β	γ	Пространств. группа и класс
1	96-901-1411	4[6CaO·3(Al_2O_3)·AlO]	51,03	1,1970	1,1970	1,1970	90°	90°	90°	I-43d, cubic
2	96-900-0966	6[CaO·CO_2]	25,10	0,4988	0,4988	1,7061	90°	90°	120°	R-3c, trigonal
3	96-900-8367	36[3CaO·SiO_2]	21,61	3,3083	0,7027	1,8499	90°	94°12	90°	Cm, monoclinic

Таблица 4

Характеристики цементного камня после влияния магнитного поля на воду, 25 циклов

№ п/п	Номер карточки	Хим. формула фазы	Доля интенсив-ности, %	*a*, нм	*b*, нм	*c*, нм	α	β	γ	Пространств. группа и класс
1	96-900-8367	36[3CaO·SiO_2]	82,43	3,3083	0,7027	1,8499	90°	94°12	90°	Cm, monoclinic
2	96-901-2792	6[CaO·4$SiO_{2.5}$]	5,39	0,55075	0,67509	0,93055	90°	94°597	90°	P2/m, monoclinic
3	96-100-1769	CaO·H_2O	4,76	0,3589	0,3589	0,4911	90°	90°	120°	P-3m1, trigonal
4	96-120-0010	6[CaO·CO_2]	6,53	0,5584	1,4600	0,5374	90°	90°	90°	Ima2, orthorhombic

Как показано в табл. 1, вода содержит повышенные концентрации растворенного кислорода и углекислого газа как одних из основных газообразных примесей воды. Известно, что одним из основных факторов метастабильности в жидкости являются растворенные газы, которые образуют газгидраты. Если пользоваться представлениями двухструктурной модели воды, согласно которым основную роль играют структурные пустоты в упорядоченной льдоподобной фазе, то молекулы CO_2 и O_2 под действием теплового движения заполняют вакансии в тетраэдрическом расположении молекул H_2O. Размеры пустот составляют 0,59 и 0,52 нм, а размер молекулы углекислого газа и кислорода – 0,33 и 0,30 нм соответственно [10]. При этом квазикристаллическая решетка из молекул воды, если она не заполнена строго определенным количеством молекул газа, термодинамически нестабильна. Это означает, что небольшие по энергии внешние воздействия могут эффективно влиять на смещение квазиравновесных структур в таких системах.

Однако, согласно термодинамическим расчетам [11], внешнее магнитное поле не должно оказывать влияния на сдвиг химического равновесия (К), т. к. магнитная восприимчивость парамагнитных частиц исходных компонентов и продуктов реакции, как правило, отличается незначительно (имеет порядок 10^{-4}–10^{-5}) и не вносит существенного вклада в константу равновесия:

$$\ln \mathrm{K} = \ln \mathrm{K}_0 + \left[H(\Delta\mu) / RT \right], \qquad (1)$$

где K_0 – константа равновесия в отсутствии внешнего воздействия; Н – напряженность магнитного поля; μ – магнитная восприимчивость; R – газовая постоянная; T – температура.

В литературных данных имеются сведения как об увеличении, так и об уменьшении концентрации кислорода при воздействии магнитным полем [12–14]. По-видимому, это разночтение прежде всего связано с условиями проведения эксперимента, моментом его аналитического определения и неконтролируемыми процессами структурообразования в исходной воде. Известно, что молекулы газов занимают внутренние полости квазикристаллической структуры жидкости. При деассоциации (разрушении) таких структур под действием внешнего магнитного поля их количество уменьшается, и растворимость газов падает. С другой стороны, силовые линии однородного магнитного поля способны ориентировать как мономерные диполи воды, так и их ассоциаты с образованием льдоподобного каркаса ассоциативных конгломератов, внутри которых посредством сил Ван-дер-Ваальса закрепляются молекулы газов. Как следствие, растворимость газов повышается. Конкуренция указанных процессов структурообразования и разрушения структур в воде должна приводить к колебательным процессам в свойствах системы в целом.

Кроме того, рассматриваемые газы имеют разную магнитную природу. Кислород является парамагнетиком, а углекислый газ проявляет диамагнитные свойства. Это означает, что молекулы O_2 будут втягиваться, а молекулы CO_2 выталкиваться из силовых линий магнитного поля, что создает дополнительные условия метастабильных состояний в структурной организации воды.

С учетом возможной роли растворенных газов в появлении отклика на внешнее воздействие нами проведено исследование по поглощению углекис-

лого газа и кислорода водопроводной водой, активированной магнитным полем, по сравнению с контрольными образцами. Растворение газов в воде исследовали с помощью установки, представленной на рис. 8.

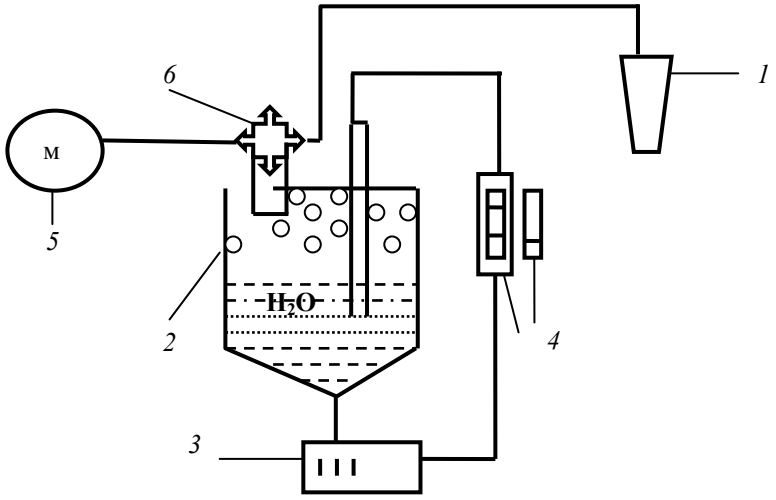


Рис. 8. Принципиальная схема установки по исследованию растворения газов в воде:
1 – устройство подачи газа; *2* – термостатированная ячейка; *3* – перистальтический насос; *4* – система магнитов; *5* – регулятор направления потока газа; *6* – манометр

Углекислый газ (или кислород) через устройство подачи газа (*1*) подавался в термостатированную ячейку (*2*), заполненную дистиллированной водой. После установления динамического равновесия в ячейке с помощью перистальтического насоса (*3*) раствор циркулировал через систему магнитов (*4*). Изменение растворимости углекислого газа (или кислорода) фиксировали по изменению давления в системе с помощью манометра (*5*) и регулятора направления потока газа (*6*).

Результаты экспериментальных данных приведены на рис. 9.

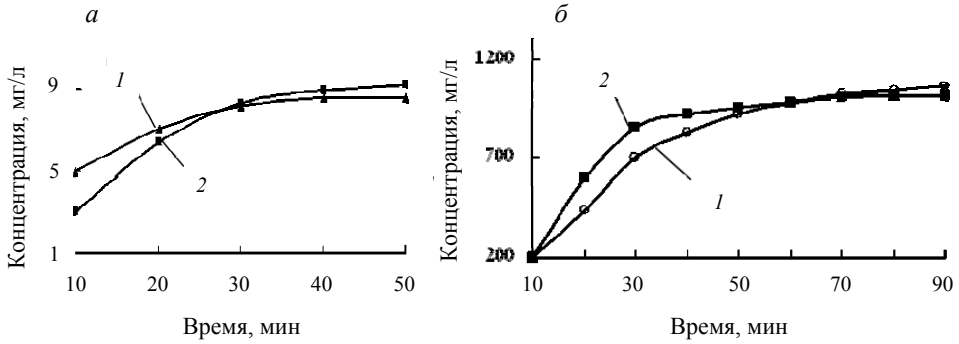


Рис. 9. Кинетические кривые поглощения кислорода (*а*) и углекислого газа (*б*):
1 – контроль; *2* – в условиях воздействия внешнего магнитного поля

Как следует из рис. 9, растворимость газов в воде при обработке магнитным полем имеет разнонаправленный характер, что, по-видимому, обусловлено различной магнитной восприимчивостью растворенных в воде газов к внешнему воздействию.

Концентрация углекислого газа в воде значительно превышает концентрацию растворенного кислорода. Более того, он способен образовывать различные формы химических соединений.

Согласно уравнению (1), энергии магнитного поля со средними значениями магнитной индукции (до 0,1 Тл) недостаточно для смещения химического равновесия в системе. Однако, когда K_0 является малой величиной, вклад второго слагаемого может быть значимым.

При растворении газа в водной системе устанавливается динамическое равновесие между различными формами угольной кислоты по уравнению

$$2HCO_3^- = CO_3^{2-} + CO_2 + H_2O.$$

Так как исследуемая вода (табл. 1) содержит гидрокарбонат-ионы, равновесный фактор является более чувствительным к количеству растворенного CO_2. Следовательно, можно предполагать, что изменение концентрации газа может быть обусловлено и изменением константы равновесия при действии сил магнитного поля. Если количество кислоты в растворе меньше равновесной концентрации, то возникает тенденция к распаду части бикарбонатных ионов, т. е. смещению равновесия вправо, и наоборот, при избытке CO_2 равновесие смещается влево. Значит, концентрация $[CO_3^{2-}]$ увеличивается, и достигается значение произведения растворимости, что связано с изменением константы равновесия при действии сил магнитного поля. Следовательно, смещение равновесия может быть обусловлено изменением величины pH раствора, неоднократно наблюдаемым экспериментально для различных растворов при действии сил магнитного поля [15]. Константа равновесия (K_p) определяется выражением

$$K_p = \frac{[CO_3^{2-}][CO_2][H_2O]}{[HCO_3^-]^2}.$$

Значение равновесных долей различных форм CO_2 приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения равновесных мольных долей различных форм диоксида углерода в зависимости от pH раствора

Химическая форма соединения	Мольная доля		
	pH = 3	pH = 7	pH = 10
CO_2	0,997	0,192	$1{,}61 \cdot 10^{-4}$
H_2CO_3	$2{,}79 \cdot 10^{-3}$	$5{,}35 \cdot 10^{-4}$	$4{,}51 \cdot 10^{-2}$
HCO_3^-	$4{,}19 \cdot 10^{-4}$	0,808	0,676
CO_3^{2-}	$2{,}01 \cdot 10^{-11}$	$3{,}88 \cdot 10^{-4}$	0,322

Из данных табл. 5 следует, что отношение концентраций химических форм $[HCO_3^-]$, $[CO_2]$, $[CO_3^{2-}]$ различается на несколько порядков и суще-

ственно зависит от значения pH среды. Следовательно, возможность смещения равновесия в системе также может быть причиной проявления эффектов внешнего воздействия магнитным полем на воду.

Учитывая, что константа диссоциации угольной кислоты по первой и второй ступени соответственно равны $K_1 = 4{,}5 \cdot 10^{-7}$, $K_2 = 4{,}8 \cdot 10^{-11}$ [16], а магнитная восприимчивость в ассоциате из молекул воды является аддитивной функцией отдельных диполей, очевидно, будет наблюдаться изменение равновесных концентраций различных химических форм угольной кислоты, которые существенно изменяют и активность жидкости затворения.

Таким образом, предложенные в работе способы и технологические приемы получения магнитной обработки воды затворения могут служить основой управления свойствами компонентов системы «цемент – вода» и процессами гидратации и структурообразования цементных систем.

Библиографический список

1. *Сафронов, В.Н.* Электрофизические технологии в производстве строительных материалов / В.Н. Сафронов. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2014. – 420 с.
2. *Safronov, V.N.* Undersuchung des Einflusses einer magnitischen Behandlung auf die Eigenschaften keramischer Materialien / V.N. Safronov, S.N. Sokolova // Keramishe zeitschrift. – 2005. – № 1. – S. 10–13.
3. *Zur Egenschaftsbeeinflussung* bei der Herstellung von Baumterialien unter Verwendung von Fluoranhydrit / A.D. Kudiakov, L.A. Anikaniva, V.N. Safronov [etc.] // Internationale Baustofftagung (Ibausil). Tagungsbericht. – 2006. – B. 1. – S. 749–758.
4. *Формирование* структур твердения в системе «низинный торф – активированная вода» / Н.О. Копаница, М.А. Ковалева, В.Н. Сафронов, Ю.С. Саркисов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 2. – С. 111–120.
5. *Цикловая магнитная* активация газонаполненных жидких сред затворения цементных систем / В.Н. Сафронов, Ю.С. Саркисов, С.А. Кугаевская, Е.В. Цилимова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 4. – С. 89–99.
6. *Саркисов, Ю.С.* Вяжущие вещества на основе оксидных систем / Ю.С. Саркисов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1. – С. 108–118.
7. *Вернигорова, В.Н.* CaO – SiO2 – H2O – динамическая диссипативная система / В.Н. Вернигорова // Изв. вузов. Строительство. – 1999. – № 1. – С. 43–48.
8. *Абзаев, Ю.А.* Полнопрофильный рентгеноструктурный анализ клинкерного минерала C4AF / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов, Д.А. Афанасьев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 200–209.
9. Условия доступа : www.crystallography.net
10. *Бык, С.Ш.* Газовые гидраты / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина. – М., 1980. – 288 с.
11. *Prashani, R.* Termodynamics of chemical system in External fields / R. Prashani // AJAA Jornal. – 1976. – V. 14. – № 7. – P. 971–973.
12. *Классен, В.И.* О влиянии примесей газов на магнитную обработку водных систем / В.И. Классен, О.Т. Крылов, Г.Г. Лазарева // Деп. рукопись № 270хп – Д 81. – ОНИИТЭХИМ, 1982. – 11 с.
13. О влиянии магнитной обработки воды на концентрацию в ней кислорода / В.И. Классен, Р.Ш. Шафеев, Г.Н. Хажинская [и др.] // Докл. АН СССР. – 1970. – Т. 190. – № 6. – С. 1391–1392.
14. *Бондаренко, Н.Ф.* Изменение свойств природных вод в магнитных полях / Н.Ф. Бондаренко, Е.З. Гак // Докл. ВаСХНИл. – 1979. – № 5. – С. 36–39.

15. *Классен, В.И.* Омагничивание водных систем / В.И. Классен. – М. : Химия, 1973. – 39 с.
16. *Лурье, Ю.Ю.* Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье. – М. : Химия, 1971. – 456 с.

REFERNCES

1. *Safronov V.N.* Elektrofizicheskie tekhnologii v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Electrophysical technologies of construction material manufacture]. Tomsk : TSUAB Publ., 2014. 420 p. (rus)
2. *Safronov V.N., Sokolova S.N.* Undersuchung des Einflusses einer magnitischen Behandlung auf die Eigenschaften keramischer Materialien, *Keramishe Zeitschrift*. 2005. No. 1. Pp. 10–13.
3. *Kudiakov A.D., Anikaniva L.A., Safronov V.N., et al.* Zur Egenschaftsbeeinflussung bei der Herstellung von Baumterialien unter Verwendung von Fluoranhydrit. Internationale Baustofftagung (Ibausil). Tagungsbericht. 2006. B. 1. Pp. 749–758.
4. *Kopanitsa, N.O., Kovaleva, M.A., Safronov, V.N., et al*. Formirovanie struktur tverdeniya v sisteme «nizinnyi torf – aktivirovannaya voda» [Solid structure formation in 'black peat – activated water' system]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009. No. 2. Pp. 111–120. (rus)
5. *Safronov, V.N., Sarkisov, Yu.S., Kugaevskaya, S.A*. Tsiklovaya magnitnaya aktivatsiya gazonapolnennykh zhidkikh sred zatvoreniya tsementnykh sistem [Cycle magnetic activation of gas-filled mixing waters for cement pastes]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009. No. 4. Pp. 89–99. (rus)
6. *Sarkisov Yu.S.* Vyazhushchie veshchestva na osnove oksidnykh system [Oxide-based binders]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 1. Pp. 108–118. (rus)
7. *Vernigorova V.N.* SaO – SiO_2 – H_2O – dinamicheskaya dissipativnaya sistema [SaO – SiO_2 – H_2O is a dynamic dissipative system]. *News of Higher Educational Institutions. Construction* 1999. No. 1. Pp. 43–48 (rus)
8. *Abzaev Yu.A., Sarkisov Yu.S., Klopotov A.A., Klopotov V.D., Afanas'ev D.A.* Polnoprofil'nyi rentgenostrukturnyi analiz klinkernogo minerala C4AF [X-ray diffraction analysis of C4AF clinker mineral]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 6. Pp. 200–209. (rus)
9. *Information on* www.crystallography.net
10. *Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I.* Gazovye gidraty [Gas hydrates]. Moscow, 1980. 288 p. (rus)
11. *Prashani R.* Termodynamics of chemical system in External fields. *AJAA Jornal*. 1976. V. 14. No. 7. Pp. 971–973
12. *Klassen V.I., Krylov O.T., Lazareva G.G.* O vliyanii primesei gazov na magnitnuyu obrabotku vodnykh sistem [Gas additive effect on magnetic processing of aquatic systems]. Dep. rukopis' N 270khp. Proc. 81. ONIITEKhIM. 1982. 11 p. (rus)
13. *Klassen V.I., Shafeev R.Sh., Khazhinskaya G.N., et al*. O vliyanii magnitnoi obrabotki vody na kontsentratsiyu v nei kisloroda [Magnetic processing of water and oxygen concentration]. *Proc. USSR Academy of Sciences*. 1970. V. 190. No. 6. Pp. 1391–1392. (rus)
14. *Bondarenko N.F., Gak E.Z.* Izmenenie svoistv prirodnykh vod v magnitnykh polyakh [Change of natural water properties in magnetic fields]. *Proc. VaSKhNIl.* 1979. No. 5. Pp. 36–39 (rus)
15. *Klassen V.I.* Omagnichivanie vodnykh sistem [Hydrologic system magnification]. Moscow : Khimiya Publ., 1973. 39 p. (rus)
16. *Lur'e Yu.Yu*. Spravochnik po analiticheskoi khimii [Analytical chemistry manual]. Moscow : Khimiya Publ., 1971. 456 p. (rus)

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 628.35:504.064

КЛОЧКО АСМИК РУБЕНОВНА, канд. архит., доцент,
asmik1985@mail.ru
КЛОЧКО АЛЕКСЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
klo4ko_aleksey@mail.ru
АРУТЮНЯН ГРАЙР РУБЕНОВИЧ, аспирант,
graair@mail.ru
Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ АДАПТАЦИИ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ Г. МОСКВЫ К ИЗМЕНИВШИМСЯ КЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ

В статье исследуются климатические изменения в контексте адаптации инженерно-конструктивных и архитектурно-планировочных решений для более комфортной жизнедеятельности населения. Отмечается необходимость надлежащих климатологических исследований и последующих научно-практических адаптационных рекомендаций в условиях современных мегаполисов, таких как Москва, которые в силу масштабного и интенсивного техногенного воздействия на окружающую среду сами становятся фактором климатообразования наряду с необратимыми географическими процессами. В статье рассматривается влияние климатических изменений на здоровье населения, раскрывается понятие «острова тепла», обосновывается необходимость периодического пересмотра строительных норм и стандартов.

Ключевые слова: остров тепла; изменение климата; биоклиматическая комфортность; климатическое районирование.

ASMIK R. KLOCHKO, PhD, A/Professor,
asmik1985@mail.ru
ALEKSEI K. KLOCHKO, PhD, A/Professor,
klo4ko_aleksey@mail.ru
GRAYR R. ARUTYUNYAN, Research Assistant,
graair@mail.ru
Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia

TOWARDS ADAPTATION OF CONSTRUCTION REGULATIONS TO CHANGED CLIMATIC CONDITIONS IN MOSCOW

The article presents the analysis of adaptation of construction regulations to climatic change as well as architectural and planning solutions to provide more comfortable life in the city of Moscow. The necessity of adequate research and subsequent scientific and practical recommendations in terms of modern megacities is indicated which in virtue of the large-scale and intensive anthropogenic impact on the environment have become the climate formation factors along with irreversible geographical processes. The article discusses the impact of climate change on human health, presents the heat island concept, explains the necessity of a systematic building code revision.

Keywords: heat island; climatic change; bioclimatic comfort; climatic zoning.

Климатические изменения, происходящие сегодня на территории всей планеты, закономерно влияют на инженерно-конструктивную и архитектурно-планировочную структуру зданий жилого назначения.

Согласно данным приборных измерений за 140-летний период существования Всемирной метеорологической организации (ВМО), последнее десятилетие было самым тёплым на Земле, а температуры в северном полушарии за последние 50 лет были самыми высокими за предыдущие 500 лет. Предполагается, что приземная температура воздуха будет продолжать повышаться на несколько десятых градуса в 100 лет в течение последующих столетий, т. к. парниковые газы живут в атмосфере длительное время, а к концу XXI в. ожидается увеличение средней приземной температуры на 1,4–5,8 °С, рост интенсивности осадков, увеличение индекса тепла (комбинация температуры и влажности). Вероятно сокращение количества морозных дней и волн холода [1, 2].

Климат России намного более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат многих других регионов мира, о чём свидетельствуют данные наблюдений и модельных расчётов (рис. 1, 2). Так, по данным сети Росгидромета, за период 1907–2006 гг. потепление в целом по России составило 1,29 °С при среднем для земного шара потеплении 0,74 °С. Размах аномалий (разность между максимумом и минимумом) среднегодовой температуры в России достигает 3–4 °С, в то время как для земного шара он лишь несколько превосходит 1 °С [3–6]. По территории России среднегодовая температура приземного воздуха в 2010 г. превысила «норму» 1961–1990 гг. на 0,65 °С, что на 0,11 °С выше температуры 2009 г.[1].

В связи с тем, что значительная часть территории РФ находится в области максимальных (в первую очередь негативных) изменений климата (засухи, пожары, экстремальные осадки, наводнения и др.), 17 декабря 2009 г. была утверждена Климатическая доктрина РФ.

В то же время идеям глобального потепления оппонируют многие видные ученые (В. Лазуткин, К.Я. Кондратьев, А.П. Капица), по мнению которых

[1] Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. Москва, 2011 / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет).

современная среда обитания находится на одном из температурных пиков, за которым последует некоторое похолодание. Директор Института океанологии РАН С.С. Лаппо полагает, что нет уверенности в достаточной изученности процессов, происходящих в различных оболочках Земли, поэтому говорить об изменении климата можно, лишь конкретизируя место, время и понимание термина «изменение климата».

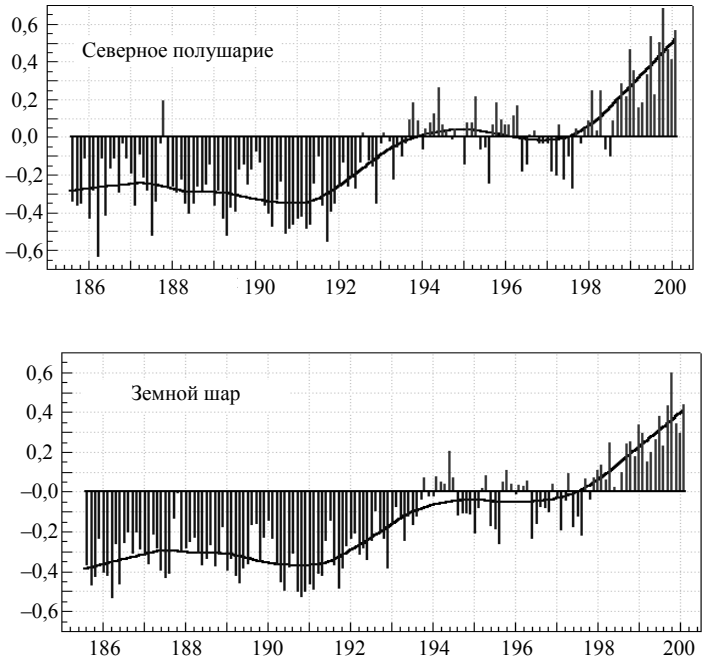


Рис. 1. Временные ряды аномалий средней годовой температуры приземного воздуха, осреднённых по территории Северного полушария и земного шара, 1856–2001 гг. [7]. Аномалии вычислены как отклонения от средней за 1961–1990 гг.

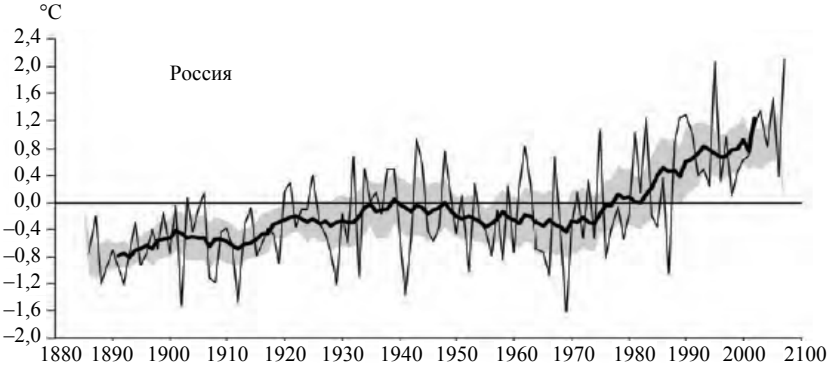


Рис. 2. Изменения среднегодовой приземной температуры воздуха (°C), осредненной по территории России, в отклонениях от средних за 1961–1990 гг. Тонкая линия показывает результаты наблюдений по станциям, жирная – сглаженный ход температуры воздуха (11-летние скользящие средние)

Если принять к сведению существующие сегодня точки зрения и учесть некоторую гипертрофированность темы глобального потепления, то нельзя отрицать очевидность устоявшейся тенденции к повышению температуры и большему увлажнению климата, и этот факт заслуживает серьезного внимания, в том числе и в контексте адаптации архитектурно-планировочных решений для более комфортной жизнедеятельности населения. Изменяющиеся климатические условия требуют надлежащих исследований и последующих научно-практических рекомендаций, и особенно в условиях современных мегаполисов, которые в силу масштабного и интенсивного техногенного воздействия на окружающую среду сами становятся фактором климатообразования наряду с необратимыми географическими процессами.

Границы наших дальнейших исследований очерчены территорией Москвы, где рост температуры с 1975 по 2000 гг. значительно опережал темпы её увеличения в мире – 0,25 °С и 0,13 °С за 10 лет соответственно. С 1900 по 2000 гг. происходило постоянное потепление, и среднегодовая температура выросла на 2,3 °С (рис. 3) [9]. Данные модельных расчетов Москвы [1, 4, 6, 8, 10] подтверждают, что на начало нашего тысячелетия приходится уже 7 абсолютных максимумов температуры, волны жары стали интенсивнее, а волны холода наблюдаются в основном с небольшой продолжительностью (табл. 1). В последние годы также участились различные аномальные явления (температурные рекорды, резкая смена погоды, большие перепады температуры и др.), воздействие которых оказывается не только дискомфортным, но и опасным для жизни и здоровья населения.

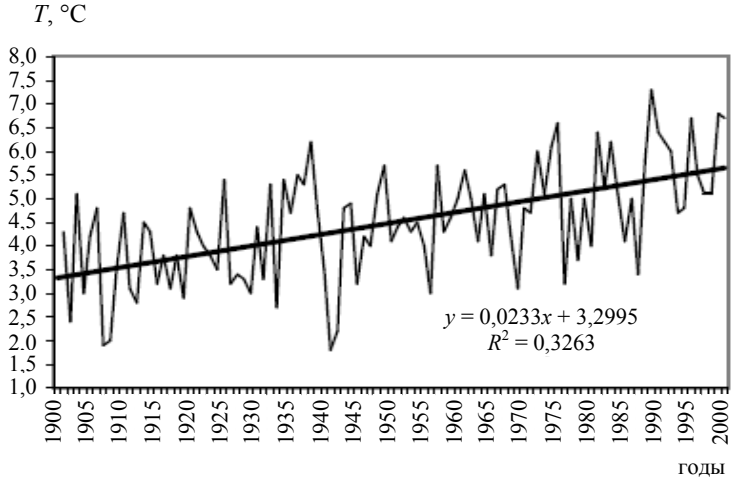


Рис. 3. Колебания и тренды температурного воздуха в Москве за 1900–2000 гг. [11]

Таблица 1

Температурные рекорды в Москве по метеостанции ВВЦ до 2010 гг.

T °С/мес	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Абс max °С	8,6	8,3	17,5	28,0	33,2	33,9	38,2	37,3	29,4	23,7	14,5	9,6	38,2
год	2007	1989	2007	1950	2007	1901	2010	2010	1890	1915	2010	2008	2010
Абс min °С	–38,1	–35,2	–27,9	–18,8	–5	0,8	5,1	2,1	–5,2	–16,1	–23,3	–38	–38,1
год	1940	1929	1913	1879	1885	1916	1886	1885	1881	1920	1890	1892	1940

При прочих похожих условиях (блокирующий антициклон, юго-восточный ветер и т. п.) в аномально жаркие летние месяцы 1936, 1938 и 1972 гг. было в среднем на 2–4 градуса прохладнее, чем в летнее время последнего десятилетия. Поэтому есть основания утверждать, что на изменение климата Москвы влияют не только общее глобальное потепление и бóльшая чувствительность России к климатическим изменениям, но и процессы урбанизации с тенденцией к образованию «острова тепла» (рис. 4).

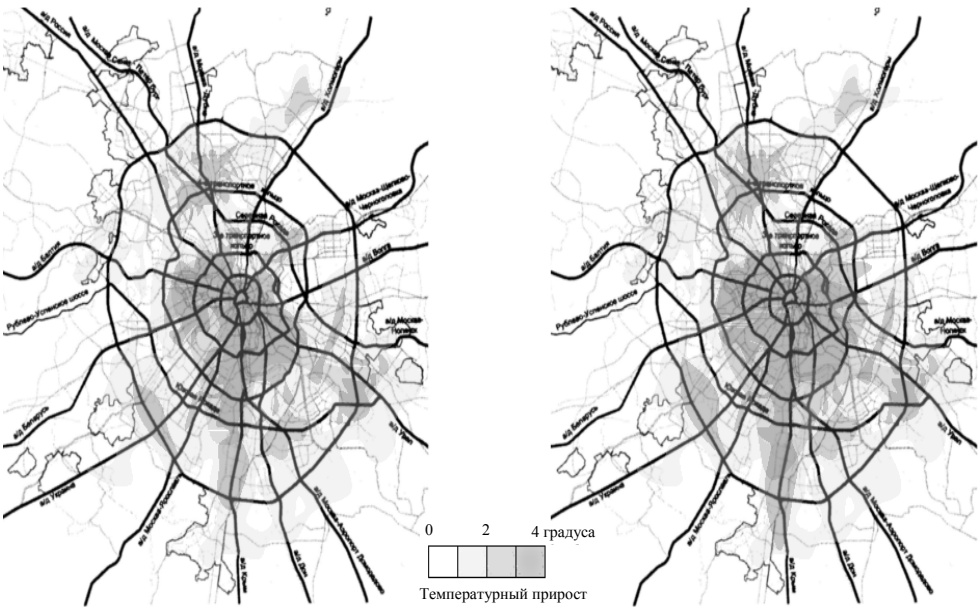


Рис. 4. «Остров тепла». Распределение тепловых аномалий городских и промышленных агломераций в Москве в июне 1996 г. (слева) и июне 1998 г. (справа) по Л.Г. Корниенко

Установлена определенная взаимосвязь «острова тепла» с колоссальным загрязнением атмосферы, что приводит к местному парниковому эффекту. Повсеместное сокращение открытых почвенных покровов, уплотнение застройки и улично-дорожной сети увеличивают долю поглощенной солнечной радиации, при этом образуется застой воздуха, и расход тепла на испарение уменьшается, что также приводит к росту теплового баланса. Потоки тепла имеют метаболическую природу за счет процессов термического уничтожения отходов, прямого энергопотребления и других источников техногенного происхождения. Интенсивность «островов тепла», образующихся над городами, зависит от их величины, плотности населения и застройки, природно-климатических условий местности [11]. Чем больше город, тем больше положительная аномалия температуры воздуха в нём [12] (рис. 5).

Например, в Москве средние различия между центром города (станция Балчуг) и пригородами в радиусе до 100 км с вероятностью до 30 % состав-

ляют от 1,5 до 10 °С [10]. О наличии «острова тепла» над Москвой как результате хозяйственной деятельности свидетельствуют также данные внутринедельного нарастания температуры от понедельника (наиболее холодный день) к пятнице (наиболее теплый день).

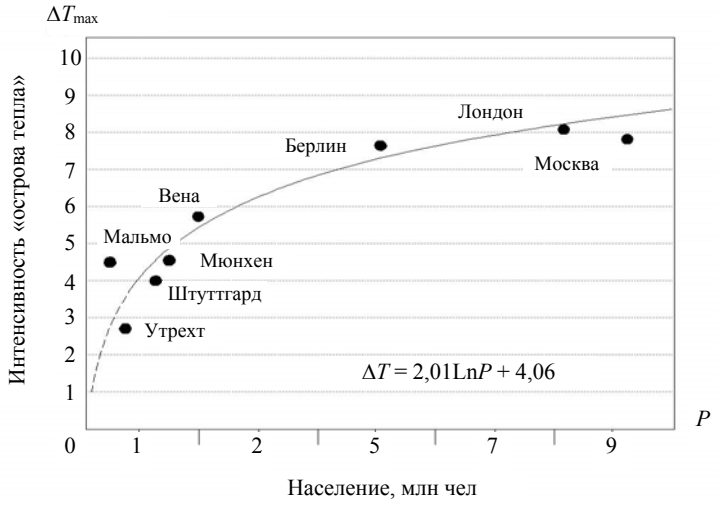


Рис. 5. Максимальная интенсивность «острова тепла» в Европе

Максимальный внутринедельный разброс температур между понедельником и пятницей наблюдается в январе (0,7 °С), минимальный – в июне (0,3 °С) (рис. 6) [10]. При этом выделяется ось выброса техногенного тепла север – центр – юг в связи с нахождением на севере и на юге производственных объектов и с наихудшим экологическим состоянием центральной части Москвы.

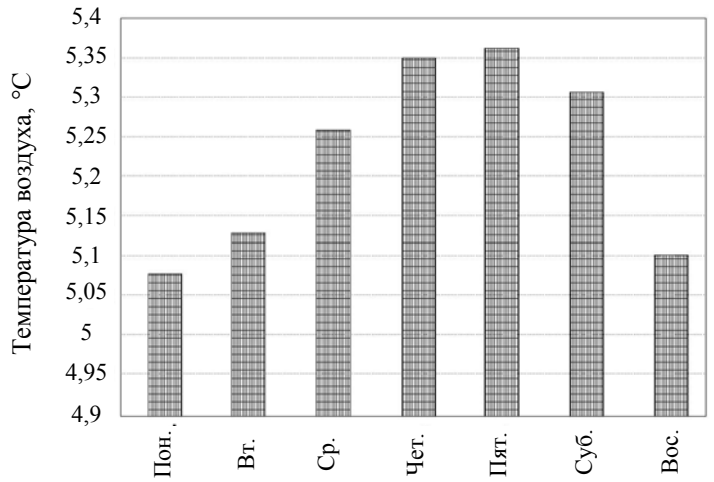


Рис. 6. Ход среднегодовой температуры воздуха по дням недели (осреднение за 1961–2002 гг.)

Для изучения вопроса о климатических изменениях по Москве был проведён расчет среднемесячных дневных и ночных температур на основании

архива погоды за период с 1999 по 2012 гг. (метеостанция «Москва, ВВЦ») (табл. 2).

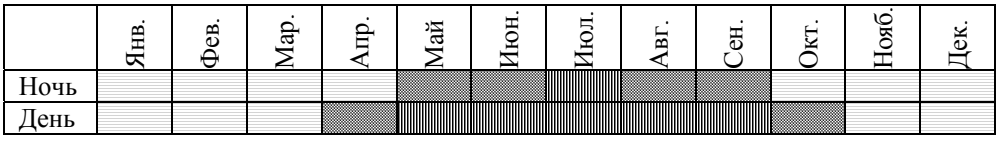
Таблица 2

Часть расчётов значений среднемесячной и годовой температур воздуха на основании архива погоды за период с 1999 по 2012 гг. (метеостанция «Москва, ВВЦ»)

Дата	Время (моск.)	Температура. Январь									
		1999	2000	2001	2007	...	2009	2010	2011	2012	
1	ночь	–8,0	–3,0	–2,0	0,0	...	–2,3	–6,0	–7,3	0,1	
	день	–6,0	–3,0	–2,0	2,6	...	–3,9	–8,9	–6,4	0,0	
2	ночь	–8,0	–5,0	–2,0	1,4	...	–8,3	–13,7	–5,4	–1,2	
	день	–7,0	–6,0	–2,0	3,4	...	–10,1	–12,2	–1,7	–2,0	
3	ночь	–7,0	–8,0	–2,0	2,4	...	–12,5	–14,9	–4,0	–3,0	
	день	–5,0	–7,0	–2,0	3,5	...	–11,5	–18,0	–8,1	–1,8	
...	...	...	...	...	...	...	...	–23,6	–13,8	–17,9	
29	ночь	–1,0	0,0	1,0	–10,7	...	–0,1	–18,2	–7,2	–15,8	
	день	1,0	0,0	2,0	–8,8	...	0,9	–13,4	–2,9	–9,5	
30	ночь	–1,0	1,0	1,0	–13,5	...	–1,7	–13,1	–8,0	–17,2	
	день	–8,0	0,0	1,0	–9,9	...	–3,7	–10,2	–4,0	–13,2	
31	ночь	–1,0	0,0	0,0	–12,1	...	–10,8	–13,0	–9,0	–19,0	
	день	–8,0	0,0	0,0	–11,0	...	–12,0	–13,0	–6,0	–20,0	
СРЕДНЕЕ		–4,0	–5,3	–3,5	–1,5	...	–5,4	–13,9	–7,2	–6,4	–6,0
ночь		–4,2	–5,8	–4,0	–2,3	...	–5,8	–15,4	–8,1	–7,2	–6,7
день		–3,8	–4,8	–2,9	–0,7	...	–4,9	–12,4	–6,4	–5,6	–5,3

Согласно проведённому сопоставительному анализу актуальная климатологическая характеристика Москвы по классификации погодных условий (ЦНИИЭП жилища) сегодня составляет 10Х 6П 6К 2Т периодов в год против прошлых (1961–1990 гг.) 12Х 6П 6К, где Х – холодный, П – прохладный, К – комфортный и Т – теплый периоды (рис. 7).

а



б

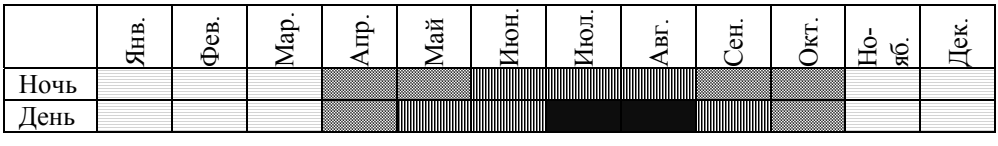


Рис. 7. Изображение типов погоды для Москвы:
а – 1961–1990 гг.; *б* – расчет автора на основании архива погоды за период с 1999 по 2012 гг.

По данным табл. 3 можно заключить, что вычисленные климатические показатели корреспондируются с данными, представленными в официальных источниках, при этом следует подчеркнуть: чем более современными являются расчёты, тем выше показатель годовой температуры, что является неоспоримым доказательством потепления климата.

Таблица 3

Сопоставление рассчитанных среднемесячных и годовых температур г. Москвы (по данным различных источников)

Месяц/№	1	2	3	4	5
Январь	–9,4	–10,2	–5,2	–6,5	–6,0
Февраль	–7,7	–9,2	–5,6	–6,7	–6,5
Март	–2,2	–4,3	–1,1	–1	–0,2
Апрель	5,8	4,4	8,1	6,7	7,7
Май	13,3	11,9	13,3	13,2	13,0
Июнь	16,8	16,0	15,9	17,0	17,1
Июль	18,4	18,1	20,9	19,2	20,7
Август	16,7	16,3	17,7	17,0	18,4
Сентябрь	11,1	10,7	12,3	11,3	12,6
Октябрь	4,9	4,3	5,7	5,5	6,5
Ноябрь	–1,4	–1,9	–0,1	–1,2	0,4
Декабрь	–6,2	–7,3	–5,7	–5,2	–3,4
Год	5,0	4,1	6,3	5,8	6,7

Примечание. 1 – Данные Гидрометеоиздата за период 1961–1990 гг. (Летопись погоды, климата и экологии Москвы. – СПб., 2003. – С. 36); 2 – данные СНиП 23-01–99* «Строительная климатология» (средняя месячная и годовая температуры воздуха по показателям температур до 1980 г.); 3 – среднемесячные значения среднесуточных температур Москвы за период 2000–2005 гг., представленные метеостанцией МГУ; 4 – среднемесячные значения среднесуточных температур за период 1981–2010 гг. (Погода и климат. Климат Москвы. Метеостанция ВВЦ); 5 – выведенные автором расчётные значения среднемесячной и годовой температур воздуха на основании архива погоды за период с 1999 по 2012 гг. (метеостанция «Москва, ВВЦ»).

Полученные автором расчётные данные среднемесячной и годовой температур воздуха значительно разнятся с показателями, представленными в СНиП 23-01–99 «Строительная климатология», что убедительно доказывает необходимость адаптации нормативных документов к современным эколого-климатическим реалиям г. Москвы. С этим положением согласны ряд специалистов, среди которых глава Метеобюро Москвы и Московской области Алексей Ляхов, который считает, что необходимо принять во внимание климатические изменения и актуализировать данные СНиП по климатологии, рассчитанные для показателей середины прошлого века. Недостаточный учет современных климатических факторов привёл к поистине драматическому увеличению числа случаев разрушения зданий в Москве. С увеличением числа циклов оттепелей и заморозков происходит изменение несущей способности грунтов и усиливаются карстовые процессы, вследствие чего ухудшаются прочностные характеристики фундаментов зданий и сооружений. В результате долговечность построенных зданий в Москве снизилась в два раза. Кроме

того, при многочисленных переходах через 0 °С в течение года межпанельные стыки в жилых домах намокают от воздействия осадков, расширяются и деформируются. При этом происходят значительные теплопотери, на стенах квартир образуются плесень, разводы, просачивается вода, проникает холодный воздух. Вследствие потепления уменьшилась потребность в отоплении помещений в холодный период года и возросла потребность в кондиционировании помещений в тёплое время года [3] (рис. 8).

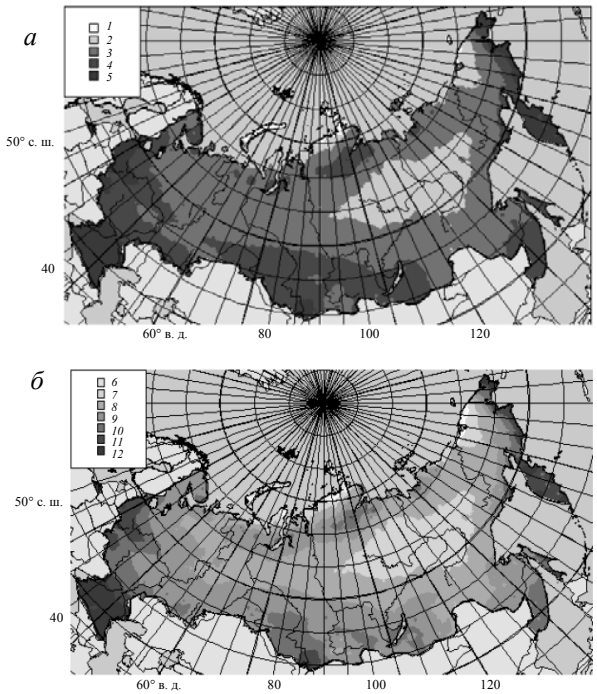


Рис. 8. Прогнозируемое сокращение продолжительности (%) отопительного периода на территории России к 2025 г. (*а*) и к 2050 г. (*б*) по сравнению с нормой 1961–1990 г.: *1* – 0–1,9; *2* – 2–3,9; *3* – 4–5,9; *4* – 6–7,9; *5* – 8–10; *6* – 0–3,9; *7* – 4–5,9; *8* – 6–7,9; *9* – 8–9,9; *10* – 10–11,9; *11* – 12–13,9; *12* – 12–14

Таким образом, высокоурбанизированная территория российской столицы наряду с географическими факторами сама стала источником техногенного климатообразования и пагубного влияния на экологию и жизненные интересы населения. Зафиксировано, что частота и количество заболеваний москвичей в среднем выше, чем жителей других районов страны, распространены болезни органов дыхания, астма, различные виды аллергии, сердечно-сосудистых заболеваний, болезни печени, желчного пузыря, органов чувств. Состояние здоровья детей дошкольного и школьного возраста с каждым годом все более ухудшается, увеличивается число детей с отклонениями в физическом развитии. Например, по исследованиям Н.И. Хорсевой (Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, Москва, РАН) [10], степень нарушения психофизиологических параметров (работоспособность, утомляемость, острота

зрения, скорость восприятия и др.) и нейропсихологических показателей (двигательные функции, уровень мышления, внимания, памяти и др.) у детей, проживающих в разных районах Москвы, различна. Степень нарушения этих параметров находится в пропорциональной зависимости от уровня экологического загрязнения территории проживания.

Согласно исследованиям, опубликованным по результатам работы 17-й ежегодной конференции Международного общества по экологической эпидемиологии (ISEE) в Париже в 2006 г., увеличение температуры на 1 °С приводит к увеличению показателя смертности на 1,8–3 % (без учета внешних причин), что совпадает с отечественными медицинскими исследованиями по Твери и Москве проф. Ревича и др. Дальнейшее загрязнение воздуха и дистрофические процессы стратосферного озонового слоя прогнозируют рост смертности, который по сравнению с температурным комфортом может достигнуть до +20 % в экстремально жаркие дни и +15 % в холодные, при этом влияние холодных температур на смертность имеет отсроченный характер, а влияние экстремальной жары проявляется незамедлительно. По данным Министерства здравоохранения и социального развития, рост смертности в аномально жарком июле 2010 г. по сравнению с июлем предыдущего года составил 17,3 % по Московской облсати и 50,7 % по Москве.

В поддержку населения в ряде стран разработаны, приняты и функционируют национальные планы действий по защите здоровья людей от аномальных погодных условий. Пионерами в этом направлении после жары 2003 г. стали Франция, затем Италия, Германия, США, Канада. Программы охватывают широкий спектр действий, в том числе градостроительные и архитектурные адаптационные решения.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) в числе мер по адаптации к изменению климата в мае 2007 г. указала на необходимость периодического пересмотра строительных норм и стандартов [6]. Эта мера была утверждена ещё в середине XIX в. на 1-м метеорологическом конгрессе в Вене, где было решено, что в качестве климатических сведений нужно давать информацию за предшествующий 30-летний период. По существующим стандартам, СНиП морально устаревают за три десятилетия, а в условиях вышеописанных климатических изменений еще быстрее.

Изменения должны затронуть, прежде всего, СП 131.1333.2012 «Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01–99*», в частности, данные о среднемесячных и годовых температурах воздуха (климатические параметры тёплого и холодного периодов года, максимальная суточная амплитуда температур воздуха в июле), климатические параметры для проектирования отопления, вентиляции и кондиционирования, средние показатели за год числа дней с переходом температуры воздуха через 0 °С и др.). Необходимо пересмотреть СНиП 41-01–2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» (например, данные о расчётных температурах наружного воздуха при применении пофасадной системы отопления), а также СНиП 3.03.01–87 «Несущие и ограждающие конструкции» (данные о температурах наружного воздуха).

Рассмотренные выше исследования позволили доказать, что для характеристики современного климата г. Москвы могли бы использоваться температурные нормы 1981–2012 гг. взамен официальных норм, которые охватывают период 1961–1990 гг. СНиПы по климатологии, рассчитанные для показателей до 1980 г., уже через несколько лет будут ощутимо отличаться от актуальных данных.

Библиографический список

1. *Наш будущий климат* (ВМО, Женева, Швейцария 2003). – Условия доступа : http://www.hmn.ru/index1.php?code=14&value=1&page=8 (дата обращения : 14.04.2013).
2. *Значительные наблюдаемые изменения*. – Условия доступа : http://mosmeteo.hmn.ru/index1.php?code=14&value=3&page=7 (дата обращения : 14.04.2013).
3. *Оценочный доклад* об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. – Москва. – 2008 / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромет. – Условия доступа : http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm (дата обращения : 18.04.2013).
4. *Изменение климата*, 2007 г. Последствия, адаптация и уязвимость. Резюме для политиков. Доклад Рабочей группы II Межправительственной группы экспертов по изменению климата. – Условия доступа : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (дата обращения : 19.04.2013).
5. *Климатическая доктрина РФ.* – Условия доступа : http://www.kremlin.ru/news/6365 (дата обращения : 19.04.2013).
6. *Climate Change 2007*: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment / B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.) // Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. *Груза, Г.В.* Климатическая изменчивость и изменения климата на территории России / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Институт Глобального Климата и Экологии Росгидромета и РАН. – 2009. – № 11. – С. 15–29.
8. *Клочко, А.Р.* Влияние климатических изменений на архитектурно–градостроительное проектирование и нормирование // Архитектура и современные информационные технологии. – 2013. – № АМІТ 1(22). – Ст. № 22/13–11.
9. *Справочник эколого-климатических характеристик г. Москвы*. Т. 2 / под ред. д.г.н. А.А. Исаева. – М. : Изд-во географ. ф-та МГУ, 2005.
10. *Ревич, Б.А.* Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей. – М., 2006. – 246 с.
11. *Город*, архитектура. Человек и климат / М.С. Мягков, Ю.Д. Губернский, Л.И. Конова, В.К. Лицкевич ; под ред. к.т.н. М.С. Мягкова. – М. : Архитектура-С, 2007. – 344 с.
12. *Climate* booklet for urban development: references for zoning and Planning. Baden-Wurttemberg Innen Ministerium. – Stuttgart, 2004.

References

1. *Nash budushchii klimat* [Our future climate] (World Meteorological Office, Geneva, Switzerland 2003) Available at : http://www.hmn.ru/index1.php? code=14&value=1&page=8 (last visited 14.04.2013).
2. *Znachitel'nye nablyudaemye izmeneniya* [Considerable observed changes]. Available at : http://mosmeteo.hmn.ru/index1.php? code=14&value=3&page=7 (last visited 14.04.2013).
3. *Otsenochnyi doklad* ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Tekhnicheskoe rezyume [The estimated report on climate changes and their conse-

quences in the territory of the Russian Federation]. Engineering report, Moscow, 2008, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. Available at : http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/index00.htm (last visited 18.04.2013).

4. *Izmenenie klimata*, 2007 g. Posledstviya, adaptatsiya i uyazvimost'. Rezyume dlya politikov. Doklad Rabochei gruppy II Mezhpravitel'stvennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata [Climatic change, 2007. Consequences, adaptation and vulnerability. The summary for politicians. Report of the Working group II of the Intergovernmental group of experts on climate change]. Available at : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_ru.pdf (last visited 19.04.2013).
5. *Klimaticheskaya doktrina* RF [Climatic doctrine of the Russian Federation]. Available at : http://www.kremlin.ru/news/6365 (last visited 19.04.2013).
6. *B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)* Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. *Gruza, G.V., Ran'kova E.Ya.* Klimaticheskaya izmenchivost' i izmeneniya klimata na territorii Rossii [Climate variability and changes in the territory of Russia]. Institut Global'nogo Klimata i Ekologii Rosgidrometa i RAN. 2009. No. 11. Pp. 15–29 (rus)
8. *Klochko A.R.* Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na arkhitekturno-gradostroitel'noe proektirovanie i normirovanie [Climatic change influence on architectural and urban planning and regulation]. Arkhitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii [Architecture and modern information technologies]. 2013. N AMIT 1 (22). Item 22/13–11. (rus)
9. *Isaev A.A.* Spravochnik ekologo-klimaticheskikh kharakteristik g. Moskvy [Reference book on ecology climatic characteristics of Moscow]. Book 2. Moscow : Moscow State University Publ., 2005. (rus)
10. *Revich B.A.* Klimat, kachestvo atmosfernogo vozdukha i zdorov'e moskvichei [Climate, air quality, and health of Muscovites]. Moscow, 2006. 246 p. (rus)
11. *Myagkov M.S., Provincial Yu.D., Konova L.I., Litskevich V.K. Myagkov M.S., Gubernskii Yu.D., Konova L.I., Litskevich V.K.* Gorod, arkhitektura. Chelovek i klimat [City, architecture. A man and climate]. Ed. M.S. Myagkov. Moscow : Arkhitektura-S Publ., 2007. 344 p. (rus)
12. *Climate* booklet for urban development: references for zoning and Planning. Baden-Wurttemberg Innen Ministerium. Stuttgart, 2004.

УДК 624.016

ФЕДЮК РОМАН СЕРГЕЕВИЧ, аспирант,
roman44@yandex.ru
Дальневосточный федеральный университет,
690000 г. Владивосток, ул. Суханова, 8

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗДАНИЙ С НЕСЪЕМНОЙ СТЕНОВОЙ ОПАЛУБКОЙ

В работе рассматриваются результаты наблюдений за поведением (в тепловлажностном отношении) наружных монолитных железобетонных стен с применением несъемной опалубки в условиях прибрежного и континентального районов юга Дальнего Востока (г. Владивосток и г. Уссурийск). Выявлен температурно-влажностный режим помещений экспериментальной квартиры и наружных стеновых ограждений. Определены фактические значения сопротивления теплопередаче наружных стен и фактическое значение коэффициента теплопроводности утеплителя. Исследован влажностный режим наружных стен перед сдачей дома в эксплуатацию.

***Ключевые слова*:** стена; пенополистирол; монолит; железобетон; тепловлажностные свойства.

ROMAN S. FEDYUK, Research Assistant,
roman44@yandex.ru
Far Eastern Federal University,
8, Sukhanova Str., 690000, Vladivostok, Russia

FIELD RESEARCH OF BUILDINGS WITH FIXED WALL FORMS

The paper deals with results of observing the at room conditions behavior of outer monolithic reinforced concrete walls having fixed wall forms in Southern Far East (Vladivostok and Ussuriysk). The room temperature of the experimental apartments and exterior walls was detected. Actual values of thermal resistance of external walls and heat conductivity of heat insulating material were detected. Humidity conditions of exterior walls were studied prior to putting the house into operation.

***Keywords*:** wall; polystyrene; monolith reinforced concrete; thermohygrometric properties.

Введение

Президент Российской Федерации В.В. Путин в 2013 г. в послании Федеральному собранию заявил: «Правительство уже определило подходы к реализации программы строительства доступного жилья. Новые технологии позволяют строить быстро, качественно, относительно недорого… Подъем Сибири и Дальнего Востока – национальные приоритеты на всё столетие» [1].

Дома с монолитными стенами в несъемной опалубке из пенополистирола (далее МСсППС) способны стать основными конструктивными решениями для строительства социального жилья. Согласно проведенному в работе [2] технико-экономическому анализу, выявлено, что сметная стоимость строи-

тельства 1 м^2 пятиэтажного жилого дома для зданий данного типа ниже, чем для других конструкций.

Лабораторное исследование с целью определения теплозащитных качеств и процесса увлажнения ограждающих конструкций, соответствующее эксплуатационному режиму, в ряде случаев не учитывает всех действующих факторов и не всегда соответствует реальным условиям эксплуатации.

Поэтому исследование теплозащитных качеств наружных монолитных железобетонных стен с применением несъемной опалубки из пенополистирола проводилось непосредственно на эксплуатируемых объектах.

Привлекательность этой системы по расчетным технико-экономическим и теплофизическим показателям, с одной стороны, и полное отсутствие исследований поведения этой системы в совершенно особых климатических условиях юга Дальнего Востока, дополненное слабой ее проработкой в российском масштабе, с другой стороны, обусловливают актуальность исследования эксплуатационных свойств стен такой конструкции для указанных условий.

К территории юга Дальнего Востока мы относим Приморский край и южную часть Хабаровского края, а также Еврейскую автономную область. Эта территория простиранием горных систем четко делится на две климатические области – континентальную и морскую (прибрежную).

Прибрежный район граничит с Тихим океаном с юга и востока, а с севера и запада граница примерно совпадает с границей климатического района IIГ. Территория находится в зоне муссонного климата с высоким количеством прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на вертикальные ограждения в зимнее время; неблагоприятным сочетанием высоких скоростей ветра с низкой температурной зимой, с низкой влажностью воздуха зимой и высокой летом; с «косыми» дождями (сочетание обильных осадков с ветром – на вертикальные поверхности выпадает осадков больше, чем на горизонтальные) летом.

Граница континентальной части совпадает с границей климатического района IВ, климат которого значительно отличается от прибрежного. Здесь наблюдаются более низкие температуры зимой, в то же время отсутствуют указанные выше особенности прибрежного климата, исходя из которых был определен набор эксплуатационных параметров.

Основная часть

Работа проводилась в рамках более масштабного исследования стеновых конструкций с несъемной опалубкой [2–9].

Программа натурного исследования предусматривала решение следующих задач:

1. Выявление температурно-влажностного режима помещений экспериментальной квартиры и наружных стеновых ограждений.

2. Определение фактических значений сопротивления теплопередаче наружных стен.

3. Определение фактического значения коэффициента теплопроводности утеплителя.

4. Проведение тепловизионных обследований с целью выявления температурного режима и теплотехнической неоднородности стен;

5. Исследование влажностного режима наружных стен перед сдачей дома в эксплуатацию.

В качестве объекта натурных исследований были выбраны жилые дома, построенные с применением несъемной опалубки из пенополистирола (ППС):

1) 5-этажный жилой дом по адресу: г. Уссурийск, ул. Раздольная, 10А (рис 1, *а*);

2) одноэтажный коттедж в районе Садгорода (г. Владивосток) (рис. 1, *б*).

а *б*

Рис. 1. Экспериментальные жилые дома:
а – 5-этажный жилой дом по адресу: г. Уссурийск, ул. Раздольная, 10А; *б* – одноэтажный коттедж в районе Садгорода (г. Владивосток)

В экспериментальных зданиях наружные стены толщиной 27 см выполнены из монолитного железобетона (15 см) с применением несъемной опалубки из пенополистирола (12(7+5)) см, изготовленной в ООО «Изодом» (г. Уссурийск Приморского края). Наружная поверхность стен покрыта штукатуркой по металлической сетке. Внутренняя поверхность стен покрыта базовым клеевым штукатурным слоем толщиной 25 мм по двум слоям стальной оцинкованной сетки, загрунтована и покрашена.

Так как стеновые ограждающие конструкции, ориентированные на север и северо-запад, имеют обычно худшие теплотехнические и влажностные показатели, исследуемые стены выбраны именно в этих направлениях. Наблюдения проводились в период ввода домов в эксплуатацию, когда были закончены все отделочные работы и подключено отопление. В зимний период сдачи здания в эксплуатацию было определено переувлажнение ограждающих конструкций технологической и метеорологической влагой. Поэтому на избранных объектах можно было исследовать влажностный режим ограждений в самый неблагоприятный период, начиная с момента сдачи домов в эксплуатацию. Качество строительства данных объектов не имело существенных отклонений от среднего для всего комплекса застройки, что позволяет распространять выводы, сделанные на основании исследований, на другие аналогичные объекты.

Кроме проведения систематических инструментальных наблюдений в опытной квартире, проводились серии выборочных инструментально-визуальных обследований других квартир этих же домов и других домов с МССППС различной ориентации. Результаты этих обследований позволили контролировать, уточнять и дополнять данные основных исследований.

Натурные теплофизические исследования ограждающих конструкций и микроклимата помещений проводились в соответствии с методикой ОСТ 20-2–74, усовершенствованной автором. Усовершенствование методики проявилось в увеличении частоты установки термодатчиков по высоте помещения (что привело к увеличению точности измерений). Принципиальной чертой методики исследования является сочетание комплексных систематических инструментальных наблюдений в опытной квартире с рядом массовых выборочных инструментально-визуальных обследований домов, а также с последующими лабораторными определениями значений теплофизических характеристик материалов стен.

Схема размещения датчиков и приборов приведена на рис. 2.

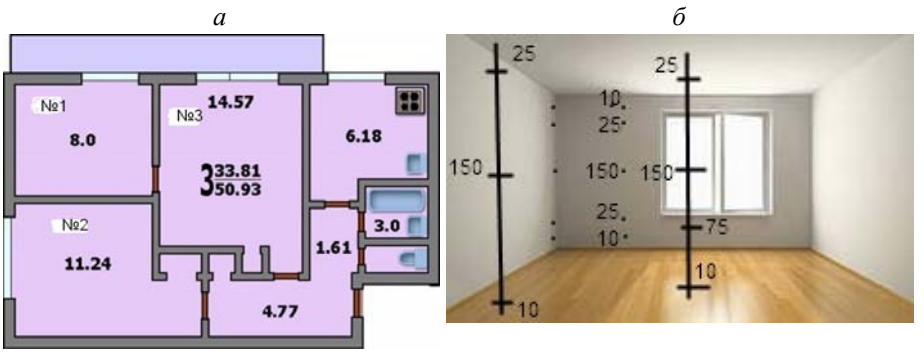


Рис. 2. План опытной квартиры и схема размещения датчиков и контрольно-измерительной аппаратуры в опытной квартире (г. Уссурийск, ул. Раздольная, 10А)

При проведении натурных теплотехнических испытаний определялись следующие показатели: $t_в$ – температура внутреннего воздуха в опытный момент (в центре на высоте 150 см от пола), °С; $t_{в0}$ – то же у пола; $t_{в10}$ – то же на расстоянии 10 см от пола; $t_{в75}$ – то же на расстоянии 75 см от пола; $t_{вн}$ – то же у потолка; $t_{вн25}$ – то же на расстоянии 25 см от потолка; $t'_в$ – температура внутреннего воздуха на расстоянии 10 см от внутренней поверхности наружной стены в исследуемом сечении на высоте 150 см от пола, °С; $t_н$ – температура наружного воздуха, °С; $t'_н$ – температура наружного воздуха на расстоянии 10 см от наружной поверхности стены в исследуемом сечении, °С; $\tau_в$ – температура внутренней поверхности наружной стены, углов и стыков на высоте 150 см от пола, °С; $\tau_{в0}$ – то же на полу; $\tau_{в10}$ – то же на расстоянии 10 см от пола; $\tau_{в25}$ – то же на расстоянии 25 см от пола; $\tau_{в75}$ – то же на расстоянии 75 см от пола; $\tau_{вн}$ – то же у потолка; $\tau_{вн10}$ – на расстоянии 10 см от потолка; $\tau_{вн35}$ – на расстоянии 35 см от потолка; τ_1 – температура по сечению стены на границе между внутренним теплоизоляционным слоем и железобетоном; τ_2 – темпера-

тура по сечению стены на границе между наружным теплоизоляционным слоем и железобетоном; Δt – температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности стены в исследуемом сечении, °С; q – тепловой поток, проходящий через наружную стену в исследуемом сечении на расстоянии 150 см от пола, Вт/м^2; $\varphi_в$ – относительная влажность внутреннего воздуха в центре комнаты на высоте 150 см от пола, %; γ_0 – плотность в сухом состоянии пенополистирола; ω – влажность пенополистирола по массе, %.

Помимо традиционных методов оценки теплозащитных качеств ограждающих конструкций, в исследованиях также использован метод теплотехнической оценки конструкции с помощью тепловизора; проведены термографические измерения распределения температуры на внутренней и наружной поверхностях ограждения.

В комплект измерительной аппаратуры входили стандартные приборы, на которых подробно останавливаться не будем.

При проведении выборочных инструментально-визуальных обследований квартир основное внимание обращалось на выявление температурно-влажностного режима в рядовых и угловых комнатах, размещенных на разных этажах и с различной ориентацией по сторонам горизонта.

Во время обследования фиксировались температура и теплозащитные качества ограждающих конструкций, влажность наружного воздуха, направление и скорость ветра у здания, общее состояние погоды. В комнатах производилось измерение температуры и влажности воздуха в средней точке помещения, температуры внутренней поверхности стен в характерных точках и температуры поверхностей радиаторов отопления (в средней точке).

Проведены также термографические обследования квартиры, фиксировалось качество уплотнения оконных и дверных притворов, видимые и невидимые дефекты, а также однородность теплозащитных свойств.

Важнейшим элементом являлось детальное изучение «поведения» стен. Отбирались пробы для изучения влажностного состояния наружных стен, проводился осмотр мест стыков и углов, где в первую очередь возможно появление конденсата при промерзании.

Выбор Владивостока и Уссурийска в качестве районов наблюдений связан с необходимостью расширения границ исследования. Владивосток входит в состав климатического района IIГ (по СНиП 23-01–99), и результаты исследования можно будет распространить на всю прибрежную территорию юга Дальнего Востока. Уссурийск входит в состав климатического района (по СНиП 23-01–99) IВ, и результаты исследования можно будет распространить на всю континентальную территорию юга Дальнего Востока. Регулярные метеорологические наблюдения в г. Владивостоке и Уссурийске производятся Приморским гидрометцентром [10–11].

Длительность первого зимнего наружного наблюдения составила 6 недель: с 16 января по 26 февраля 2012 г. (для Владивостока) и с 9 января по 19 февраля 2011 г. (для Уссурийска). Температура наружного воздуха за этот период для Владивостока составила: средняя – минус 9,1 °С, минимальная – минус 22 °С, максимальная – 0 °С. Температура наружного воздуха за этот

период для Уссурийска составила: средняя – минус 12,1 °С, минимальная – минус 30 °С, максимальная – минус 3 °С.

За основной расчетный период был выбран интервал с наиболее устойчивой температурой наружного воздуха:

– для Владивостока: с 31 января по 15 февраля 2012 г. Средняя температура воздуха за этот период составила минус 12,4 °С;

– для Уссурийска: с 21 января по 5 февраля 2011 г. Средняя температура воздуха за этот период составила минус 11,7 °С.

Колебания температуры теплоносителя в радиаторах измерялись посредством термометра-пирометра Testo Ex–Pt 720 (рис. 3–4).

Рис. 3. Измерение температуры радиаторов

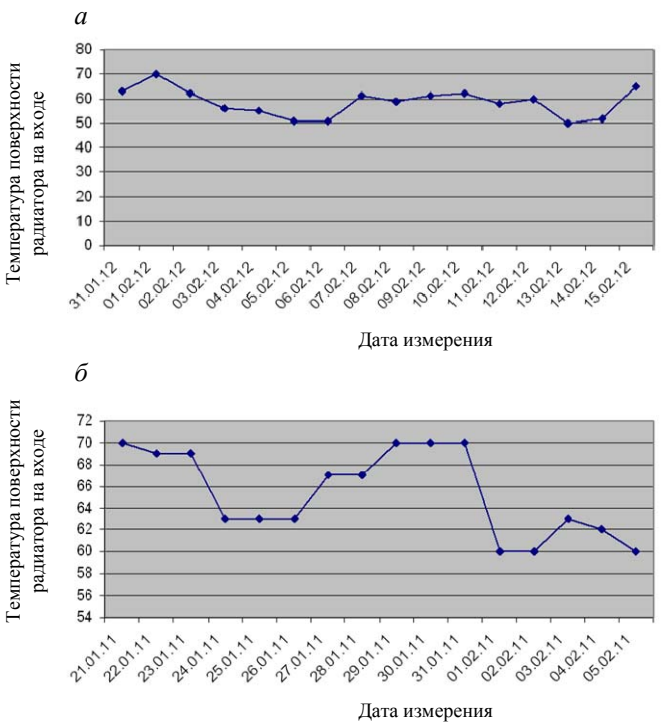


Рис. 4. Колебания температуры поверхности радиаторов на входе:
а – Владивосток; *б* – Уссурийск

Анализируя данные графики, видим, что температура теплоносителя менялась в весьма широких пределах в зависимости от температуры наружного воздуха.

Амплитуда колебаний температуры радиатора составляет 20 °С для Владивостока и 10 °С для Уссурийска.

Колебания температуры теплоносителя в радиаторах, естественно, вызывали соответствующие колебания температуры воздуха в помещениях. Наиболее резкие колебания воздуха наблюдались в комнате № 1 опытной квартиры (г. Владивосток) 6, 7 и 13, 14 февраля 2012 г., когда температура наружной поверхности радиатора опускалась до 50 °С (табл. 1–2).

Таблица 1

Среднесуточные значения температуры и относительной влажности внутреннего и наружного воздуха по данным натурных наблюдений и определение температуры точки росы (опытная квартира, г. Владивосток)

Дата	Относительная влажность $\varphi_в$, %	Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Относительная влажность наружного воздуха $\varphi_н$ %	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Температура точки росы $t_р^{эксп}$, °С
31.01.12	56	18,1	79	–12,0	7,4
01.02.12	46	18,9	81	–17,9	7,6
02.02.12	46	19,0	98	–16,1	7,9
03.02.12	47	18,3	78	–15,8	7,8
04.02.12	48	18,0	74	–14,3	7,4
05.02.12	49	19,0	74	–13,2	7,6
06.02.12	50	18,4	90	–18,1	7,9
07.02.12	51	19,9	81	–6,9	7,8
08.02.12	52	18,9	84	–7,3	7,4
09.02.12	53	19,7	87	–8,5	7,6
10.02.12	54	19,3	90	–9,4	7,9
11.02.12	45	18,1	87	–10,2	7,8
12.02.12	56	18,4	93	–11,4	8,1
13.02.12	56	18,0	78	–12,7	7,0
14.02.12	47	18,8	79	–12,4	7,3
15.02.12	53	19,0	80	–12,9	7,8
Среднее	54	18,6	81	–12,4	7,7

Таблица 2

Среднесуточные значения температуры и относительной влажности внутреннего и наружного воздуха по данным натурных наблюдений и определение температуры точки росы (опытная квартира, г. Уссурийск)

Дата	Относительная влажность $\varphi_в$, %	Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Относительная влажность наружного воздуха $\varphi_н$ %	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Температура точки росы $t_р^{эксп}$, °С
21.01.11	55	18,9	48	–18,1	7,4
22.01.11	46	19,7	55	–19,2	7,6
23.01.11	46	19,3	42	–6,2	7,9

Окончание табл. 2

Дата	Относительная влажность $\varphi_в$, %	Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Относительная влажность наружного воздуха $\varphi_н$ %	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Температура точки росы $t_р^{эксп}$, °С
24.01.11	47	18,1	43	–15,5	7,8
25.01.11	48	18,4	39	–11,4	7,4
26.01.11	49	18,0	50	–7,8	7,6
27.01.11	50	18,8	48	–15,5	7,9
28.01.11	51	19,0	46	–3,3	7,8
29.01.11	52	18,1	45	–15,4	7,4
30.01.11	53	18,9	40	–3,1	7,6
31.01.11	54	19,0	37	–11,2	7,9
01.02.11	45	18,3	48	–12,4	7,8
02.02.11	56	18,0	38	–11,3	8,1
03.02.11	56	19,0	60	–16,1	7,0
04.02.11	47	18,4	56	–12,1	7,3
05.02.11	53	19,9	61	–7,9	7,8
Среднее	53	18,7	51	–11,7	7,7

Как следует из табл. 1–2, относительная влажность воздуха в опытных квартирах практически оставалась в течение расчетного периода наблюдений на постоянном уровне и в среднем составляла: во Владивостоке $\varphi_{ср}$ = 53 % (φ_{min} = 45 %, φ_{max} = 55 %), в Уссурийске $\varphi_{ср}$ = 54 % (φ_{min} = 45 %, φ_{max} = 56 %). В основном температурно-влажностный режим опытной квартиры удовлетворяет санитарно-гигиеническим нормам и имеет характерные параметры, которые можно наблюдать во многих малоэтажных жилых домах.

Полученные за период наблюдений значения температуры на внутренней поверхности ограждений могут в значительной степени служить критерием для оценки теплозащитных и санитарно-гигиенических качеств ограждающих конструкций.

При средних за расчетные периоды наблюдений значениях температуры наружного воздуха, равных –12,4 и –11,7 °С, средние температурные перепады от внутреннего воздуха к поверхности стены находились в пределах: в опытной квартире (Владивосток) по вертикали 2*а* – 3,9 °С, в квартире (Уссурийск) по вертикали 2*в* – 3,1 °С, что не превышает нормируемого СНиП 23-02–2003 значения, равного для стен 4 °С. Выпадение конденсата за время наблюдений на поверхностях стены не наблюдалось.

Известно, что увеличение плотности и влажности материалов снижает теплозащитные качества ограждающих конструкций. В связи с этим были проведены отбор пробы на влажность и вырезка пенополистирола для определения плотности (рис. 5).

Рис. 5. Контрольный вырез

В табл. 3 приведены теплотехнические показатели наружного пенополистирольного слоя наружных стен в экспериментальных квартирах по данным натурных наблюдений.

Таблица 3

Теплотехнические показатели наружного слоя пенополистирола стеновых конструкций

Наименование показателей	R_0, м^2·°С/Вт	λ, Вт/(м^2·°С)	$W_м$, %	γ_0, кг/м^3
Стена северо-западной ориентации (Владивосток)	2,53	0,030	3,7	27
Стена юго-восточной ориентации (Уссурийск)	2,47	0,029	2,9	27

Заключение

Натурные наблюдения за температурно-влажностным режимом жилых домов и монолитных стен, возведенных с применением несъемной опалубки в г. Владивостоке и Уссурийске, а также теплотехнические исследования в климатической камере позволяют сделать следующие выводы:

1. Микроклимат в обоих исследуемых домах в течение расчетного периода наблюдений был благоприятным: температура внутреннего воздуха $t_н$ = 18–20 °С (для обоих городов), относительная влажность воздуха: во Владивостоке $\varphi_{ср}$ = 53 % (φ_{min} = 45 %, φ_{max} = 55 %), в Уссурийске $\varphi_{ср}$ = 54 % (φ_{min} = 45 %, φ_{max} = 56 %).

2. При экспериментальных среднесуточных параметрах внутреннего воздуха (см. п. 1) установлено, что температура внутренних поверхностей стен по полю, в углах и стыках по высоте от пола до потолка выше значений точки росы ($t_р^{эксп}$), что исключает выпадение конденсата.

3. Фактическое сопротивление теплопередаче наружных пенополистирольных слоев толщиной 75 мм оказалось равным R_0 = 2,53 м^2·°С/Вт, λ = 0,030 Вт/(м^2·°С) при $W_м$ = 3,7 % и γ_0 = 27 кг/м^3 и R_0 = 2,47 м^2·°С/Вт, λ = 0,029 Вт/(м^2·°С) при $W_м$ = 2,9 % и γ_0 = 27 кг/м^3.

4. Установлено, что в климатических условиях Владивостока и Уссурийска использование конструкционного пенополистирола в качестве опалубки (и, соответственно, теплоизоляционных слоев) позволяет обеспечить нормативную теплозащиту за счет утепления железобетонного слоя с двух сторон слоями пенополистирола – 7 см (внешний слой) и 5 см (внутренний слой).

Библиографический список

1. *В Послании Президента* особое внимание было уделено социальным и экономическим вопросам. – Условия доступа : http://www.1tv.ru/news/polit/248209?utm_source=dlvr.it&utm_medium=twitter
2. *Федюк, Р.С.* Монолитные железобетонные ограждающие конструкции с применением несъемной опалубки из пенополистирола / Р.С. Федюк // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 10 (81). – С. 185–190.

3. *Федюк, Р.С.* Системное проектирование энергоэффективных зданий / Р.С. Федюк // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2011. – № 3. – С. 19–23.
4. *Федюк, Р.С.* Долговечность различных марок строительного пенополистирола / Р.С. Федюк // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 5. – С. 143–148.
5. *Федюк, Р.С.* Теплотехнические испытания монолитных железобетонных стеновых ограждений с применением несъемной опалубки из пенополистирола / Р.С. Федюк // Бетон и железобетон. – 2013. – № 6. – С. 18–20.
6. *Федюк, Р.С.* Несущие монолитные железобетонные стены с применением несъемной опалубки из пенополистирола // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2013. – № 4. – С. 105–114.
7. *Федюк, Р.С.* Системное проектирование энергоэффективных зданий. Монография / Р.С. Федюк // Lambert Academic Publishing, 2011. – 108 с.
8. *Федюк, Р.С.* Учет климата юга ДВ в проектировании энергоэффективных жилых зданий: монография / Р.С. Федюк // Lambert Academic Publishing, 2012. – 166 с.
9. *Федюк, Р.С.* Наружные железобетонные стены с несъемной опалубкой из пенополистирола: монография / Р.С. Федюк // Lambert Academic Publishing, 2013. – 185 с.
10. *Дашко, Н.А.* Курс лекций по синоптической метеорологии / Н.А. Дашко. – Владивосток : ДВГУ, 2005.
11. *Воробьев, В.И.* Синоптическая метеорология / В.И. Воробьев. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1994.

REFERENCES

1. *V Poslanii Prezidenta* osoboe vnimanie bylo udeleno sotsial`nym i ekonomicheskim voprosam [In President's letter special attention was paid to social and economic proplems]. Available at : http://www.1tv.ru/news/polit/248209?utm_source=dlvr.it&utm_medium=twitter
2. *Fedyuk R.S.* Monolitnye zhelezobetonnye ograzhdayushchie konstruktsii s primeneniem nes"emnoy opalubki iz penopolistirola [Monolithic concrete walling using permanent formwork of expanded polystyrene]. *Vestnik IrSTU* [Irkutsk State Technical University], 2013, No. 10 (81). Irkutsk, 2013. Pp. 185–190. (rus)
3. *Fedyuk R.S.* Sistemnoe proektirovanie energoeffektivnykh zdanii [Systems design of energy efficient buildings]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*, 2011. No 3. Pp. 19–23. (rus)
4. *Fedyuk R.S.* Dolgovechnost` razlichnykh marok stroitel`nogo penopolistirola [Durability of different polystyrene foam types]. *Vestnik KuzSTU* [Kuzbass State Technical University], 2013. No 5. Pp. 143–148. (rus)
5. *Fediuk R.S.* Teplotekhnicheskie ispytaniya monolitnykh zhelezobetonnykh stenovykh ograzhdenii s primeneniem nes"emnoi opalubki iz penopolistirola [Thermal testing of monolithic concrete wall enclosures using fixed expanded polystyrene formwork]. *Beton i zhelezobeton*. No. 6. 2013. Pp. 18–20. (rus)
6. *Fedyuk R.S.* Nesushchie monolitnye zhelezobetonnye steny s primeneniem nes"emnoy opalubki iz penopolistirola [Bearing monolithic concrete walls with fixed polystyrene foam wall forms]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya,* 2013. No. 4. Pp. 105–114. (rus)
7. *Fedyuk R.S.* Sistemnoe proektirovanie energoeffektivnykh zdanii [Systems design of energy efficient buildings]. *Lambert Academic Publishing*, 2011. 108 p. (rus)
8. *Fedyuk R.S.* Uchet klimata yuga DV v proektirovanii energoeffektivnykh zhilykh zdaniy [Accounting for climate of the South Far East in energy-efficient housing design]. *Lambert Academic Publishing*, 2012. 166 p. (rus)
9. *Fedyuk R.S.* Naruzhnye zhelezobetonnye steny s nes'emnoy opalubkoy iz penopolistirola [Exterior concrete walls with fixed polystyrene foam shuttering]. *Lambert Academic Publishing*, 2013. 185 p. (rus)
10. *Dashko N.A.* Kurs lektsiy po sinopticheskoy meteorologii [Course on synoptic meteorology]. Vladivostok : Far Eastern Federal University Publ., 2005. (rus)
11. *Vorob`ev V.I.* Sinopticheskaya meteorologiya [Synoptic meteorology]. St-Petersburg : *Gidrometeoizdat,* 1994. (rus)

УДК 697.3

КУРИЛЕНКО НИКОЛАЙ ИЛЬИЧ, канд. физ.-мат. наук, профессор,
kurilenkoni@mail.ru
МИХАЙЛОВА ЛАРИСА ЮРЬЕВНА, канд. техн. наук, доцент,
kurilenkoni@mail.ru
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2
АРТАМОНОВ ПАВЕЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,
kurilenkoni@mail.ru
ООО «МАКСТЕРМ»,
625047, г. Тюмень, ул. Володарского, 14

ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БЛОЧНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Представлены основные особенности воздушного режима блочных автоматизированных котельных. Рассмотрена основная система отопления в котельных такого типа. Разработана типовая модель блок-бокса котла с дутьевой горелкой. Рассчитана нестационарная модель подогрева воздуха, поступающего на горение. Проанализированы причины перегрева верхней зоны в случае использования прямого угла атаки тепловой завесы. Предложены мероприятия по повышению равномерности распределения температуры воздуха по высоте. Показана экономическая выгода от использования предложенной системы.

Ключевые слова: воздухообмен; воздушный режим; котельные установки; автоматизированные котельные.

NIKOLAI I. KURILENKO, PhD, Professor,
kurilenkoni@mail.ru
LARISA Yu. MIKHAILOVA, PhD, A/Professor,
kurilenkoni@mail.ru
Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering,
2, Lunocharskii Str., 625001, Tyumen, Russia
PAVEL A. ARTAMONOV, Research Assistant,
kurilenkoni@mail.ru
MAXTERM Company,
14, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia

UNITED AIR FLOW TO IMPROVE PERFORMANCE OF BLOCK AUTOMATED BOILER

The main features of the air mode block automated boilers. Consider the main heating system in this type of boiler . Developed typical block-box model of the boiler with blow torch. Calculated non-stationary model of heating the air entering the combustion. Analyzed the causes overheating of the upper zone in the case of direct angle of attack of the air curtain. Proposed measures to improve the temperature uniformity in height. The economic benefits from the use of the proposed system.

Keywords: air exchange; air regime; boiler systems; automated boiler rooms.

В настоящее время огромное внимание уделяется вопросам энергосбережения. Одной из первостепенных задач по повышению уровня энергоэффективности является максимальное улучшение качества теплогенерирующих установок. Популярным видом источников теплоснабжения является блочно-модульная автоматизированная котельная. Такие котельные имеют ряд отличительных особенностей, таких как минимальные габариты, транспортабельность, высокая степень автоматизации, ориентирование на работу в экстремальных условиях и др. Эти особенности создают повышенные требования к деталям проектирования, в том числе системы отопления [1, 2]. Из-за большой площади теплоотдающих поверхностей (трубы, арматура, изоляция оборудования) котельная является местом с явными избытками теплоты, и вопрос об отоплении в отсутствие персонала не кажется первостепенной проблемой. Для стационарных котельных больших объемов с высокой тепловой инерцией этот вопрос действительно не актуален. В блочно-модульных котельных, как правило, мало свободного объёма, следовательно, наблюдается большая подвижность воздуха, т. к. объём воздуха, необходимый для сжигания топлива, намного превосходит количество воздуха, необходимое для обеспечения общеобменной вентиляции. Высокая подвижность воздуха и низкие температуры способствуют обмерзанию оборудования при сохранении средней температуры внутреннего воздуха на уровне нормируемых 5 °С (СНиП II-35–76 с изм.).

На сегодняшний день практика эксплуатации показала, что наиболее надежной системой отопления помещения котельной является воздушное отопление с использованием тепловентиляторов, работающих по принципу тепловой завесы.

Но насколько эффективна работа этой системы? Для анализа эффективности построим математическую модель типового блок-бокса с установленным в нем котлом мощностью 3 МВт. Моделирование процесса основано на методе конечных элементов [3–5] и решении уравнения неразрывности согласно уравнению

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(U\rho) = 0\,, \tag{1}$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3; t – время, с; U – вектор скорости, м/с;

Закон сохранения импульса описывается уравнением

$$\frac{\partial(U\rho)}{\partial t} + \nabla(U\rho \otimes U) = -\nabla p + \nabla\tau + S_M\,, \tag{2}$$

где p – абсолютное давление, Па; S_M – объемный источник массы, кг/м^2·с^3; τ – тензор напряжения, описывается уравнением

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta\nabla U)\,, \tag{3}$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с; δ – функция Кронекера; T – температура, К;

Изменение энергии в момент времени находится согласно уравнению

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \frac{\partial(p)}{\partial t} + \nabla(U\rho h_{tot}) = \nabla(\lambda\nabla T) + \nabla(U\tau) + US_M + S_E, \qquad (4)$$

где h_{tot} – полная энтальпия, зависящая от статической энтальпии в соответствии с формулой

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2. \qquad (5)$$

Выражение $\nabla(U\tau)$ отображает работу вязких напряжений и называется вязкостным компонентом работы. Оно моделирует внутренний нагрев вязкости в жидкости и в нашем случае имеет незначительный эффект, которым можно пренебречь.

Выражение US_M отображает работу внешних источников импульса, в расчете ими пренебрегаем; S_E – объемный источник энергии, кг/м·с^3.

Габариты котла получим усреднением габаритов котлов аналогичной мощности различных производителей, таких как WOLF, Viessmann, LOOS и др. Габарит типового бокса выбираем из условий соблюдения транспортных габаритов, габаритов котла, горелки, минимизации капитальных затрат и нормативных расстояний перед взрывным клапаном и горелкой (ПБ 10-574–03). Габариты типового котла мощностью 3,0 МВт – 4700×2230×2400 мм, габариты типового бокса: длина – 8000 мм, ширина – 3000 мм, высота стоек – 3000 мм, высота по коньку кровли – 3900 мм. Вытяжной вентилятор, установленный под коньком крыши, обеспечивает однократный воздухообмен. Тепловентилятор выбран производства фирмы Kroll, расход которого равен 1,65 кг/с, а мощность зависит от температуры по эмпирическому закону, выведенному на основе данных завода-изготовителя:

$$Q_к = –0{,}6 \cdot t_{вх.к} + 65, \qquad (6)$$

где $Q_к$ – тепловая мощность калорифера, кВт; $t_{вх.к}$ – температура на входе в калорифер, °С.

Расход воздуха на горение – 1,335 кг/с.

Задача является нестационарной с полным интервалом времени в 900 с и шагом в 10 с. Начальные условия: температура внутреннего воздуха – 5 °С, абсолютное давление – 0,1013 МПа.

Логическим оператором включения и выключения системы отопления является информация о температуре воздуха, поступающего в горелку: если температура воздуха меньше 5 °С, то тепловентилятор включается, если же в конце временного шага температура не становится ниже заданного значения, то тепловентилятор не включится. Результатами вычисления в конце каждого временного шага являются:

T Outlet – температура воздуха, удаляемого из помещения, K;

T Volum – среднеобъемная температура по боксу, K;

T Burner – температура воздуха, поступающего в горелку, K;

T Kroll – температура на выходе из тепловентилятора, K;

G Kroll – расход через калорифер, кг/с.

Для анализа эффективности работы тепловентилятора как тепловой завесы рассчитаем при различной температуре наружного воздуха случай, когда угол атаки завесы будет перпендикулярен оси приточной решетки. Усредненные за интервал измерения результаты изображены синими маркерами на рис. 1–3.

Как видно из полученных результатов, при перекрестном направлении потоков в распределении температуры в котельной наблюдается перегрев верхней зоны, который характеризуется разностью величин *T* Outlet (воздух, удаляемый вытяжным вентилятором из верхней зоны) и *T* Burner (воздух, забираемый горелкой из нижней зоны) и линейно возрастает с уменьшением температуры наружного воздуха (рис. 1). Также необходимо заметить, что еще одной характеристикой возрастания температурного градиента с понижением температуры наружного воздуха является кривая, отображающая разницу между *T* Volum и *T* Burner (рис. 2).

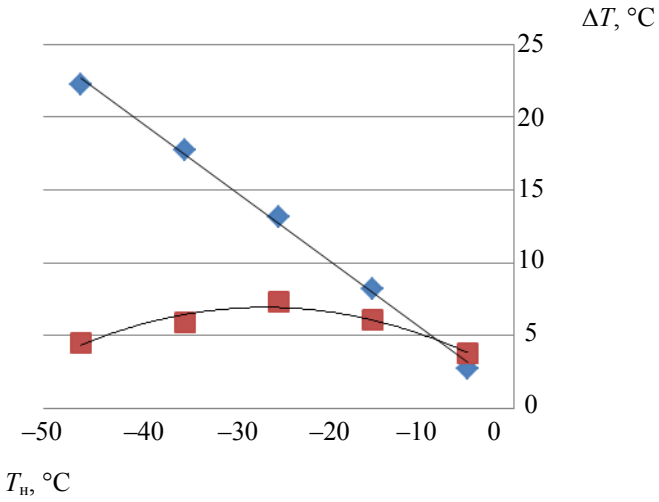


Рис. 1. Зависимость разности *T* Outlet и *T* Burner от температуры наружного воздуха

При этом, учитывая данные по доле времени работы тепловентилятора (рис. 3), можно сделать вывод, что при перекрестной системе организации подогрева воздуха наблюдается плохое перемешивание потоков от калорифера и от приточной решётки. В результате этого воздух из перегретой верхней зоны отводится непосредственно в атмосферу, что плохо согласуется с необходимостью энергосбережения.

Проблема перегрева верхней зоны и низкая температура у пола для котельных достаточно актуальна. В первую очередь это связано с требованием нормативной документации об установке приточных решеток позади котла. Компактность котельной и сравнительно небольшая высота здания не позволяют воздуху ассимилировать тепло при движении из верхней зоны. Поток наружного воздуха, поступая в котельную неизотермической струей, обладает минимальной величиной проникновения и, настилаясь на пол, подается к го-

релке, которая осуществляет забор воздуха из нижней зоны. При заборе холодного воздуха на горение КПД котла снижается [1]. Кроме того, тепловентилятор не получает сигнала о выключении, тем самым расходуя тепло, которое уходит в атмосферу из верхней зоны. Все это в сумме снижает КПД всей котельной.

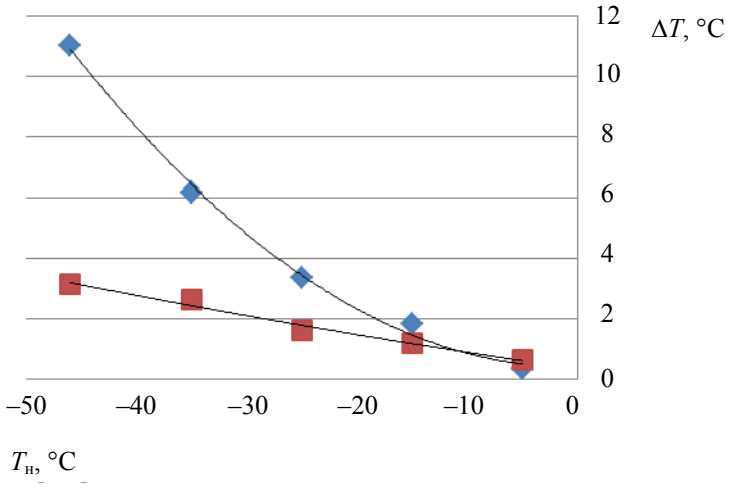


Рис. 2. Зависимость разности *T* Volum и *T* Burner от температуры наружного воздуха

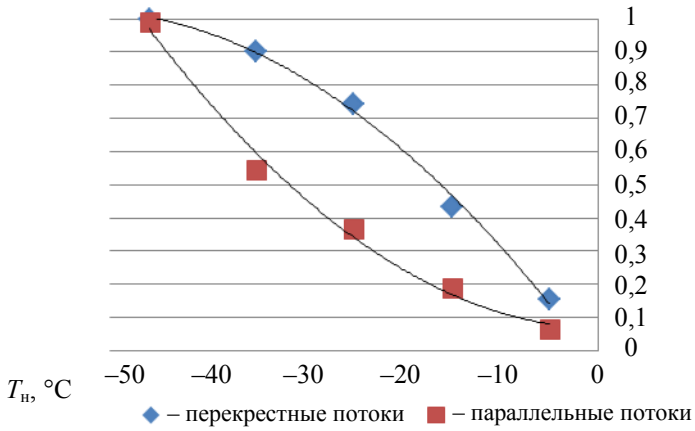


Рис. 3. Доля времени работы тепловентилятора в зависимости от температуры наружного воздуха

Применение системы отопления тепловентиляторами обусловлено высокой надежностью и относительно невысокими капитальными вложениями, однако, как мы видим, данная система обладает низкой эффективностью перемешивания потоков горячего и холодного воздуха. Практические наблюде-

ния за работой воздушных завес показывают, что в условиях высокой подвижности и разных плотностей потоки горячего и холодного воздуха в системах воздушного отопления не склонны к перемешиванию [6]. При поиске возможного решения этой проблемы было предложено изменять «угол атаки» тепловентилятора, однако это не давало существенного улучшения в снижении градиента изменения температуры по высоте. Было решено использовать направляющие воздуховоды с нулевым углом атаки завесы (рис. 4). Такое решение позволит использовать разную плотность горячего и холодного потоков для направленного движения наружного воздуха в зону теплоизбытков и значительного ослабления скорости струи.

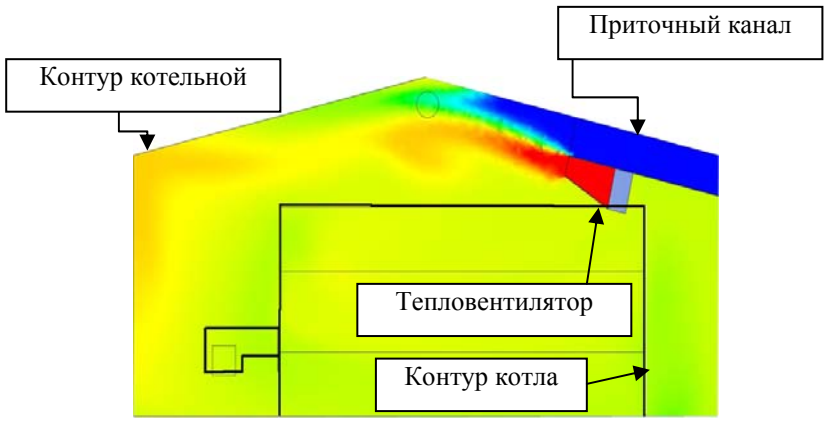


Рис. 4. Принцип организации отопления котельной с использованием параллельно направленных воздушных потоков

Результаты, полученные в процессе моделирования, отображены красными маркерами на рис. 1–3. Как можно заметить, такая система дала значительное улучшение в снижении величины градиента температуры по высоте и снизила перегрев верхней зоны, при этом параметры воздуха на входе в горелку абсолютно идентичны варианту с перекрестной организацией воздушного потока. Обращает на себя внимание характер зависимости, представленной на рис. 1. В отличие от случая с использованием перпендикулярного направления потоков, где наблюдается линейная характеристика, параллельная организация движения воздуха характеризуется параболической кривой с точкой экстремума в значении аргумента минус 25 °С. Данный график наглядно показывает значительный рост эффективности системы с понижением температуры наружного воздуха, демонстрируя повышение равномерности распределения температуры воздуха по высоте как следствие наибольшей ассимиляции тепла помещения котельной. Кроме этого, благодаря ассимиляции теплоизбытков верхней зоны, снизилась доля использования системы отопления по времени (см. рис. 3). Время использования тепловентилятора является величиной, напрямую отображающей количество тепла, идущего на нагрев воздуха. Другими словами, снижение доли времени работы теплокалорифера уменьшает расходы тепла на собственные нужды, т. е. повышает общий КПД

котельной. Часовая экономия газа, рассчитанная на теплотворную способность, равную 36000 кДж/м^3, при использовании параллельно направленных воздушных потоков в зависимости от температуры наружного воздуха отображена на рис. 5. При этом наибольший экономический эффект достигается при температуре наружного воздуха, равной –30 °С.

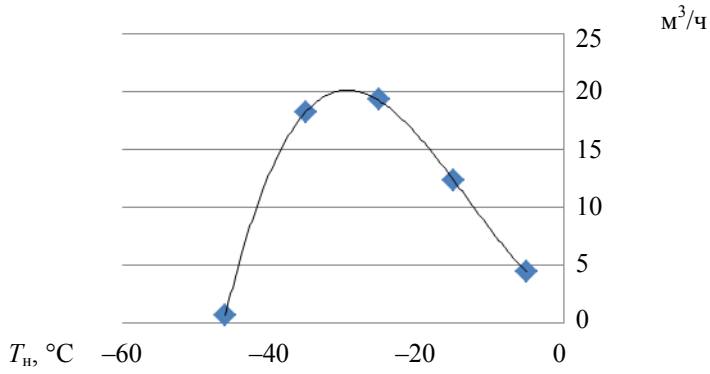


Рис. 5. Часовая экономия газа при использовании параллельных потоков в зависимости от наружной температуры

Таким образом, повышение требований к энергосбережению заставляет менять подходы к практике проектирования и задействовать более сложный алгоритм расчетов. В настоящей статье разработана математическая модель типового блок-бокса теплопроизводительностью 3 МВт, которая наглядно продемонстрировала недочеты в существующей системе организации отопления автоматизированных котельных. Также был предложен метод ассимиляции теплоизбытков посредством параллельной организации воздушных потоков.

Библиографический список

1. *Куриленко, Н.И.* Особенности воздушного режима блочных автоматизированных котельных установок / Н.И. Куриленко, Л.Ю. Михайлова, П.А. Артамонов // Сб. материалов XIII Научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. – Тюмень, 2014.
2. *Использование* параллельно направленных воздушных потоков для оптимизации системы отопления блочных автоматизированных котельных / Н.И. Куриленко, А.З. Идрисов, Л.Ю. Михайлова, П.А. Артамонов // Сб. материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень, 2014.
3. *ANSYS HELP*: Chapter 4: Mathematical Models of CFX. – Условия доступа : http://www.iesd.dmu.ac.uk/research_degrees/publications/mjc_thesis/ch4/ch4.pdf
4. *Каплун, А.Б.* ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. − М. : Едиториал УРСС, 2003. − 272 с.
5. *Басов, К.А.* ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М. : ДМК Пресс, 2006. – С. 240.
6. *Behnia, M.* Numerical Study of Turbulent Heat Transfer in Confined and Unconfined Impinging Jets / M. Behnia, S. Parneix, Y. Shabany and P.A. Durbin // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 1999. – № 20. – P. 1–9.

REFERENCES

1. *Kurilenko N.I., Mikhailova L.Yu., Artamonov P.A.* Osobennosti vozdushnogo rezhima blochnykh avtomatizirovannykh kotel'nykh ustanovok [Air conditions of block automated boiler plants]. *Proc. 13th Sci. Conf. of Students and Young Scientists TyumGASU* [Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering]. Tyumen', 2014. (rus)
2. *Kurilenko N.I., Idrisov A.Z., Mikhailova L.Yu., Artamonov P.A.* Ispol'zovanie parallel'no napravlennykh vozdushnykh potokov dlya optimizatsii sistemy otopleniya blochnykh avtomatizirovannykh kotel'nykh [Using the parallel direction of air flow to optimize the heating block automated boiler]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Relevant problems of Construction, Ecology, and Energy Saving in Western Siberia'*. Tyumen', 2014. (rus)
3. *ANSYS HELP*: Chapter 4:Mathematical Models of CFX. Available at : http://www.iesd.dmu.ac.uk/research_degrees/publications/mjc_thesis/ch4/ch4.pdf
4. *Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A.* ANSYS v rukakh inzhenera: Prakticheskoe rukovodstvo [ANSYS in hands of engineer: a practical guide]. Moscow : Editorial URSS Publ., 2003. 272 p. (rus)
5. *Basov K.A.* ANSYS i LMS Virtual Lab. Geometricheskoe modelirovanie [ANSYS and LMS Virtual Lab. Geometric modeling]. Moscow : DMK Press, 2006. 240 p. (rus)
6. *Behnia M., Parneix S., Shabany Y., and Durbin P.A.* Numerical Study of Turbulent Heat Transfer in Confined and Unconfined Impinging Jets. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1999. No. 20. Pp.1–9.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 693.547:624.131

ТИТОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
agd_tmm48@mail.ru
ГОЛУБЕВА ДАРЬЯ НИКОЛАЕВНА, аспирант,
golubewa.dasha2010@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

ТЕХНОЛОГИЯ ОТОГРЕВА МЕРЗЛОГО ГРУНТА ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТОВ

Рассматриваются постановка и решение тепловой задачи отогрева промороженного грунтового основания. Проводится сравнение результатов, полученных в процессе математического моделирования прогноза температурного поля в грунтовом массиве в процессе его отогрева, с экспериментальными данными. Приведены графики для определения температуры поверхности нагревателя и времени прогрева грунта на глубину 30 см до 0 °С в зависимости от мощности нагревателя, температуры окружающего воздуха и поверхности грунтового массива.

Ключевые слова: мерзлый грунт; технология отогрева; фундамент; зимнее бетонирование; бетон.

MIKHAIL M. TITOV, DSc, Professor,
agd_tmm48@mail.ru
DARYA N. GOLUBEVA, Research Assistant,
golubewa.dasha2010@yandex.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia

FROZEN SOIL WARMING TECHNOLOGY IN CONCRETE CASING OF FOUNDATIONS

The paper presents the problem of frozen soil warming. Results obtained in the process of mathematical modeling of the temperature field in soil mass in the process of its warming were compared with experimental data. Presented are diagrams for determining the surface tempera-

ture of the heater and the time of warming soil up to 0 °C to 30 cm depth depending on the power of the heater, air and soil surface temperatures.

Keywords: frozen soil; warming technology; foundation; winter concrete casing; concrete.

В СНиП 3.03.01–87*, п. 2.56, и рекомендациях по электрообогреву монолитного бетона[1] приведены следующие требования: «промерзшее грунтовое или искусственное основание при зимнем бетонировании монолитных конструкций фундаментов, как правило, необходимо отогреть на всю глубину промерзания до температуры 5–10 °С. При большой толщине мерзлого грунтового основания необходимо оттаять его не менее чем на $^{3}/_{4}$ глубины промерзания и не менее чем на 500 мм для связных и 300 мм для несвязных грунтов. Размеры участков отогретого основания должны выступать за внешний обрез бетонируемых конструкций по всему периметру на двойную глубину оттаивания, но не менее чем на 1 м».

В ряде литературных источников [3–8] отмечается необходимость полезного использования естественного тепла, аккумулированного в талой части грунта основания, и искусственного тепла, внесенного в грунт при предварительном оттаивании и прогреве мерзлого слоя в процессе практической реализации технологии зимнего бетонирования монолитных конструкций фундаментов зданий (фундаментных плит, монолитных ростверков-балок и ростверков-плит, буронабивных свай и др.).

Таким образом, в процессе практической реализации технологии зимнего бетонирования монолитных конструкций фундаментов зданий как для энергосбережения, так и для оптимального использования тепла, внесенного в грунтовый массив при его отогреве, а также выполнения рекомендаций[2] необходим достоверный метод расчета прогноза температурного поля грунтового массива при его прогреве до оптимальной температуры, обеспечивающей выполнение ряда технологических операций и набора бетона подошвы фундамента критической прочности.

Математическая постановка задачи (в упрощенном виде) отогрева и прогрева промороженного грунтового основания с плоским поверхностным нагревателем может быть представлена в виде следующей системы уравнений:

[1] Рекомендации по электрообогреву монолитного бетона и железобетона нагревательными проводами / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. М. : Изд-во ЦНИИОМТП. 1989. 67 с.

[2] Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1982. 213 с.

$$
\left.
\begin{aligned}
&1.\ \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a_{\text{Т}} \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2},\\
&2.\ \frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a_{\text{М}} \frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2},\\
&3.\ t(x,0) = f_1(x),\\
&4.\ \lambda \frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = \alpha[t(0,\tau) - f_2(\tau)],\\
&5.\ \frac{\partial t(\infty,\tau)}{\partial x} = 0,\\
&6.\ t(x,\tau)\big|_{x=z-0} = t(x,\tau)\big|_{x=z+0} = t,\\
&7.\ \lambda_{\text{М}} \frac{\partial t(z,\tau)}{\partial x} - \lambda_{\text{Т}} \frac{\partial t(z,\tau)}{\partial x} = W \frac{dz}{d\tau},
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

где 1 – дифференциальное уравнение теплопроводности в талой зоне грунтового массива; 2 – дифференциальное уравнение теплопроводности в мерзлой зоне грунтового массива; величина $a_{\text{М,Т}} = \dfrac{\lambda_{\text{М,Т}}}{C_{\text{М,Т}}}$, м^2/ч, носит название «коэффициента температуропроводности» материала соответственно для мерзлого и талого грунтового массива, характеризует способность среды выравнивать свою температуру; 3 – начальное условие; 4 – граничное условие III рода на поверхности грунтового основания; 5 – граничное условие I рода, задается закон распределения температуры на бесконечной границе тела; 6 – условия на фазовой границе оттаивания и замерзания грунтового массива; 7 – классическое граничное условие Стефана на границе раздела фаз при замерзании (оттаивании) влаги, здесь $W = \varepsilon \rho_{\text{ск}} \omega$ – это скрытая теплота фазовых переходов по рассматриваемой оси; ε – удельная теплота плавления льда (334 кДж/кг).

Решение поставленной задачи можно осуществить комбинированным сеточным методом [1].

Суть комбинированного сеточного метода заключается в следующем: в узлах расчетной области, не смежных с фронтом фазового перехода, температура определяется из явной разностной схемы, а для точек смежных узлов – из неявной.

Реализация этой задачи осуществлялась комбинированным сеточным методом в программном продукте MAPLE_12, кроме того, моделирование процесса отогрева производилось в ELCUT 5.10 (профессиональная версия).

Для изучения изменения температурного поля в грунтовом массиве был проведен эксперимент с грунтом ненарушенного строения в полевых условиях. С момента включения нагревателя до момента достижения 0 °С на глубине 30 см потребовалось 54 ч. В качестве нагревателя использовался термоэлектромат (ТЭМ) конструкции ООО СТВ.

Температурное поле грунтового массива, полученного в результате обработки экспериментальных данных, и сравнение с температурным полем,

полученным в результате расчета с использованием комбинированного сеточного метода и моделирования процесса отогрева, приведены на рис. 1.

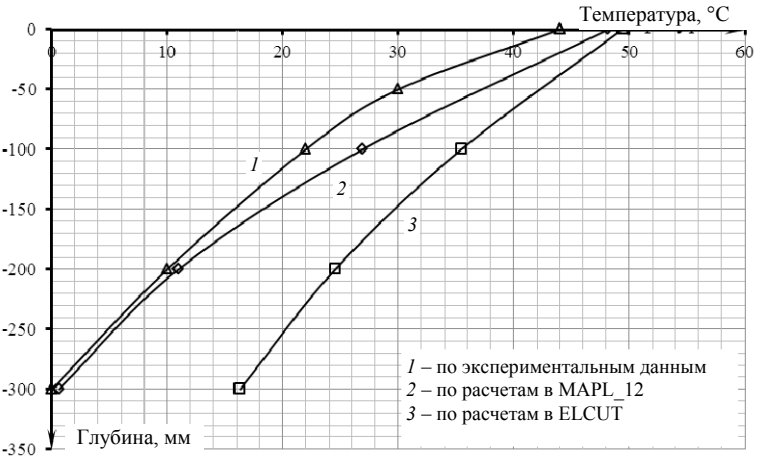


Рис. 1. Температурные поля в грунтовом массиве в течение 54 ч от начала оттаивания грунта, полученные с использованием ELCUT 5.7, MAPL_12 и экспериментально

Расхождения температурных полей, полученных экспериментальным путем и в результате расчета в программном продукте ELCUT, возможно, связаны с тем, что из-за сложности определения теплофизических характеристик грунтового массива (теплопроводность λ, Вт/(м·°С), удельная теплоемкость *С*, Дж/(кг·°С)) эти значения были взяты из СНиП 2.02.04–88, а не определены экспериментально. Значительную роль играет также отсутствие 100%-го теплового контакта поверхности нагревателя и поверхности грунтового массива в реальных условиях, тогда как в программе ELCUT предполагалось, что этот контакт является 100%-м. Расхождения с MAPLE_12 могут быть получены из-за упрощений, внесенных при написании программы, таким ообразом, необходима ее дальнейшая доработка.

Решение математической модели (1) основывается на том, что известна температура нагревателя, в то время как на практике известна только мощность нагревателя. Строителям крайне важно иметь решение приведенной выше задачи через известную удельную мощность нагревателя Вт/м^2, исходя из чего можно получить все другие теплотехнические параметры (глубина и время прогрева в зависимости от мощности, от температуры наружного воздуха и начального распределения температур грунтового массива). Для этого с применением программного продукта ELCUT (профессиональная версия) были построены графики для определения температуры поверхности нагревателя в зоне контакта с мерзлым грунтом и времени прогрева промороженного грунтового основания в зависимости от удельной мощности нагревателя и теплофизических характеристик грунта.

На рис. 2 и 3 приведены примеры графиков для определения времени отогрева песка разной крупности (плотность ρ = 1400 кг/м^3; влажность ω = 0,2; теплопроводность $\lambda_{тал}$ = 1,57 Вт/(м·°С), $\lambda_{мер}$ = 1,86 Вт/(м·°С); объемная теплоемкость $C_{тал}$ =1771 Вт/(м^3·°С), $C_{мер}$ =1350 Вт/(м^3·°С)).

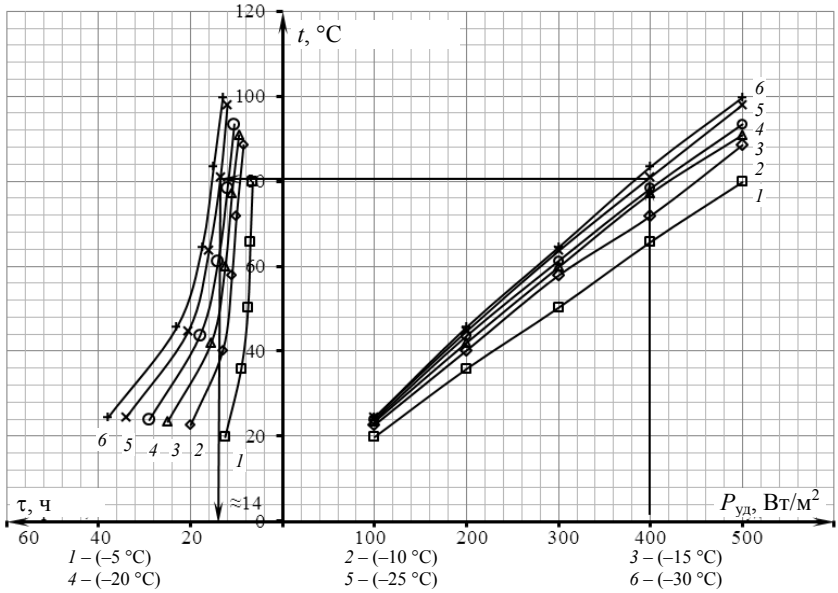


Рис. 2. График для определения температуры поверхности термоэлектромата и времени прогрева песка разной крупности на глубину 30 см до 0 °С (в зависимости от удельной мощности термоэлектромата) при температуре поверхности грунтового массива –5, –10, –15, –20, –25, –30 °С, при толщине утеплителя (вспененного полиэтилена) δ = 0,01м, $K_{пр}$ = 3,4 Вт/(м²·°С), R = 0,29 м²·°С/Вт

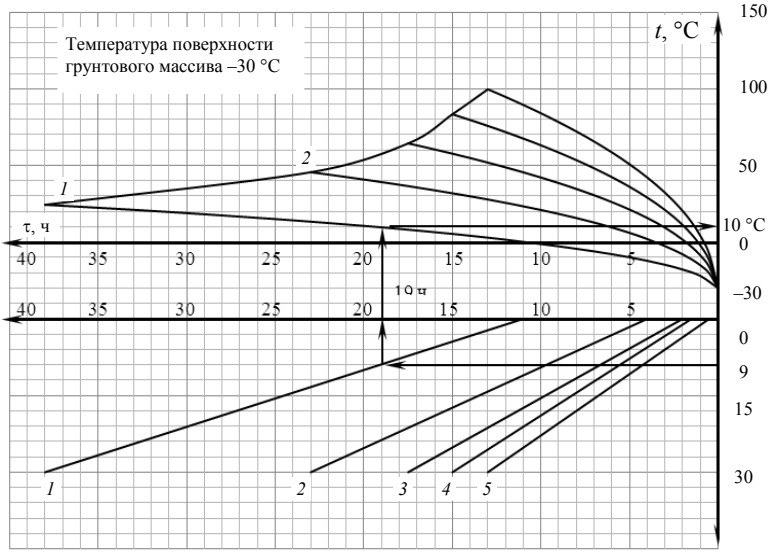


Рис. 3. График для определения времени прогрева песка разной крупности на различную глубину до 0 °С (в зависимости от удельной мощности нагревателя) при температуре поверхности грунтового массива –30 °С, толщине утеплителя (вспененного полиэтилена) δ = 0,01 м, $K_{пр}$ = 3,4 Вт/(м²·°С), R = 0,29 м²·°С/Вт:
1 – 100 Вт/м²; *2* – 200 Вт/м²; *3* – 300 Вт/м²; *4* – 400 Вт/м²; *5* – 500 Вт/м²

Графики данного типа были построены для грунтов, имеющих различные теплофизические характеристики.

Следует отметить, что приведенные графики (рис. 2, 3) были построены в предположении, что между поверхностью нагревателя и промороженного грунтового основания имеется 100%-й тепловой контакт, которого в реальных условиях достичь очень сложно, поэтому построенные графики требуют уточнения в зависимости от практики реального применения.

Для расчета экономической целесообразности применения ТЭМ в практике отогрева промороженного основания можно использовать метод оценки организационно-технической надежности [2] работы ТЭМ, позволяющий спрогнозировать основные технико-экономические показатели технологии подготовки грунтов основания зданий к зимнему бетонированию конструкций фундаментов.

Библиографический список

1. *Доленко, П.Д.* Обогрев мерзлых массивов при бетонировании гидротехнических сооружений в зимних условиях: дис. … канд. техн. наук: 5.23.07 / П.Д. Доленко. – Новосибирск, 1988. – 156 с.
2. *Титов, М.М.* Оценка организационно-технической надежности строительных машин при производстве бетонных работ / М.М. Титов, О.И. Недавний, С.М. Кузнецов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1 – С. 196–205.
3. *Молодин, В.В.* Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях: монография / В.В. Молодин, Ю.В. Лунев. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 300 с.
4. *Завалишина, Т.В.* Энергосберегающая технология зимнего бетонирования строительных конструкций : монография / Т. В. Завалишина. – Новосибирск : НГАСУ, 2003. – 132 с.
5. *Завалишина, Т.В.* Энергосберегающий режим электрообогрева при зимнем бетонировании строительных конструкций / Т. В. Завалишина, С. Н. Шпанко // Изв. вузов. Стр-во. – 2001. – № 9–10. – С. 65–75.
6. *Попов, Ю.А.* Методы решения актуальных научно-технических задач в строительстве : учебное пособие / Ю. А. Попов, Т. В. Богатырева, В. С. Лаптев. – Новосибирск : Изд-во НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 212 с.
7. *Лунев, Ю.В.* Математическое моделирование процесса замерзания (оттаивания) связных грунтов / Ю.В. Лунев // Сб. трудов V «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии». – Новосибирск : изд-во ИТПМ СО РАН, 2005. – С. 50.
8. *Лунев, Ю.В.* Математическое моделирование процесса замерзания (оттаивания) связных грунтов / Ю.В. Лунев, О.А Шалгунова // Тр. НГАСУ. – 2005. – Т. 8. – № 1(31). – С. 33–45.

References

1. *Dolenko P.D.* Obogrev merzlykh massivov pri betonirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v zimnikh usloviyakh [Heating frozen arrays for concreting waterworks in winter. PhD Thesis]. Novosibirsk, 1988. 156 p. (rus)
2. *Titov M.M., Nedavnii O.A., Kuznetsov S.M.* Otsenka organizatsionno-tekhnicheskoi nadezhnosti stroitel'nykh mashin pri proizvodstve betonnykh rabot [Assessment of organizational and engineering reliability at concrete works]. *Vestnik of Tomsk State Architectural University*. 2013. No. 1. Pp. 196–205. (rus)

3. *Molodin V.V., Lunev Yu.V.* Betonirovanie monolitnykh stroitel'nykh konstruktsii v zimnikh usloviyakh: monografiya [Concrete casting of structures in winter conditions. Monograph]. Novosibirsk : NGASU (SIBSTRIN) Publ., 2006. 300 p. (rus)
4. *Zavalishina T.V.* Energosberegayushchaya tekhnologiya zimnego betonirovaniya stroitel'nykh konstruktsii : monografiya [Energy saving technology of concrete casing in winter conditions. Monograph]. Novosibirsk : NGASU Publ., 2003. 132 p. (rus)
5. *Zavalishina T.V., Shpanko S.N.* Energosberegayushchii rezhim elektroobogreva pri zimnem betonirovanii stroitel'nykh konstruktsii [Energy saving at concrete casing in winter conditions.]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2001. No. 9–10. Pp. 65–75. (rus)
6. *Popov Yu. A., Bogatyreva T. V., Laptev V. S.* Metody resheniya aktual'nykh nauchno-tekhnicheskikh zadach v stroitel'stve [Problem solution in construction]. Novosibirsk : NGASU (SIBSTRIN) Publ., 2006. 212 p. (rus)
7. *Lunev Yu.V.* Matematicheskoe modelirovanie protsessa zamerzaniya (ottaivaniya) svyaznykh gruntov [Mathematical simulation of freezing and thawing of binder soils]. *Proc. All-Rus. Conf. 'Problems of mechanics: theory, experiment, and new technologies'*, Novosibirsk : Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS Publ., 2005. P. 50. (rus)
8. *Lunev Yu.V., Shalgunova O.A.* Matematicheskoe modelirovanie protsessa zamerzaniya (ottaivaniya) svyaznykh gruntov [Mathematical simulation of freezing and thawing of binder soils]. NGASU Publ. 2005 V. 8. No. 1(31). Pp. 33–45. (rus)

УДК: 669.24’ 783:539.389.1

АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук,
abzaev@tsuab.ru
ГНЫРЯ АЛЕКСЕЙ ИГНАТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
tsp_tgasu@mail.ru
КОРОБКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
korobkov@hotmail.ru
ГАУСС КСЕНИЯ СЕРГЕЕВНА, магистрант,
gauss.ksyu@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ*

Приведены результаты анализа механических свойств и фазового состава цементного камня с песчаным наполнителем. Представляет интерес анализ влияния температуры на интенсивность твердения цементного камня на основе данных о механических характеристиках материала. Является важным также определение структурного состояния исследуемого цементного камня с песчаным наполнителем, имеющим различные размеры зерен.

Статья посвящена детальному анализу интенсивности роста прочностных характеристик цементного камня при повышенных температурах в изотермических условиях и определению временного интервала достижения веществом максимальной прочности. Определение количественного фазового состава исследуемого вещества в исходном состоянии осуществляется методом Ритвельда.

Ключевые слова: портландцемент; метод Ритвельда; параметры решетки; количественный фазовый анализ; аморфная фаза.

YURI A. ABZAEV, DSc, Professor,
abzaev@tsuab.ru
ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,
tsp_tgasu@mail.ru
SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,
korobkov@hotmail.ru
KSENIYA S. GAUSS, Undergraduate Student,
gauss.ksyu@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE SPECIMENS AT HIGH TEMPERATURES

The paper presents the analysis of mechanical properties and phase composition of cement stone with sand filler. The temperature analysis of cement stone hardening based on its me-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке работ по гранту РФФИ (проект №13-08-00505а), а также по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

chanical properties is of great interest. Also, it is important to determine the structural state of cement stone with sand filler having different grain sizes. The aim of this work is to analyze the growth of strength property intensity of cement stone at high temperatures under isothermal conditions and to determine the time interval of achieving the maximum strength. Quantification of phase composition in the initial state is carried out by the Rietveld method.

Keywords: Portland cement; Rietveld method; lattice parameters; quantitative phase analysis; amorphous phase.

Методика эксперимента

Накопление прочности цементным камнем моделировалось на бетонных образцах двух составов, различающихся мелко- и крупнозернистым размером песчаного наполнителя. Исследовались физико-механические свойства бетонных кубиков 20×20×20 мм как при комнатной, так и при повышенных температурах. При комнатной температуре испытывалось 6 образцов с крупнозернистым и 9 образцов с мелкозернистым песком. Механические испытания сжатием образцов проводились на испытательной машине Instron со скоростью деформации 4 мм/мин. При испытаниях при повышенных температурах прогрев образцов производился в температурной камере. Методика температурных испытаний приведена на рис. 1. После 8 ч вылеживания при комнатной температуре образцы подвергались нагреву до T = ~80 °C в течение 7 ч. При изотермической температуре 80 °C образцы находились 9 ч и затем охлаждались до комнатной температуры в течение 6 ч. Температурному нагреву подвергались 48 бетонных кубиков с мелко- и крупнозернистым песком (21 образец каждого состава). Стрелками на рис. 1 указаны температуры, при которых образцы извлекались из общего числа для проведения механических испытаний при комнатной температуре.

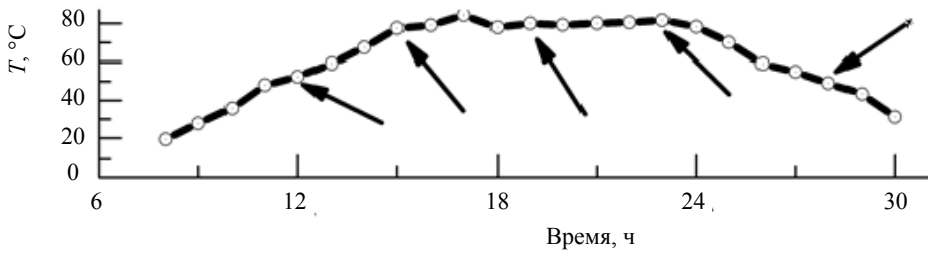


Рис. 1. Вариация температуры нагрева бетонных образцов со временем температурного прогрева. Стрелками указаны точки анализа механических характеристик

Значения механических характеристик приведены в табл. 1–4. В работе анализировались также механические свойства 6 образцов двух составов, которые были подвергнуты дополнительной сушке в течение 4 ч после 30-часового температурного испытания. Для анализа механических свойств исследуемых образцов были выбраны следующие параметры: модуль упругости, предел текучести, предел прочности, а также интервал пластической области на кривых напряжение – деформация ($\sigma - \varepsilon$). Модуль упругости характеризует интенсивность накопления прочности образцов в области упругих деформа-

ций. Предел текучести σ_0 на кривых течения $\sigma - \varepsilon$ (рис. 2) соответствует напряжению перехода от линейной зависимости (1) к пластическому деформированию. Предел прочности $\sigma_{пр}$ соответствует наибольшему значению напряжений на зависимостях $\sigma - \varepsilon$ и характеризует начало развития макроразрушения образцов.

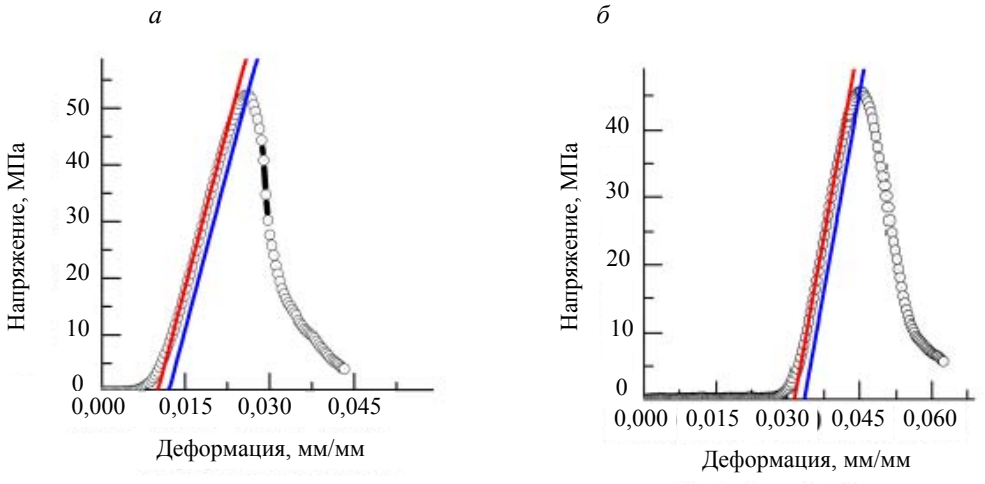


Рис. 2. Типичные кривые деформации бетонных образцов:
а – крупнозернистый песок; *б* – мелкозернистый песок; красная линия – прямая, аппроксимирующая линейный участок; синяя линия – прямая, проходящая через предел прочности

Для оценки модуля упругости кривые $\sigma - \varepsilon$ (рис. 2) на линейном участке аппроксимировались зависимостью

$$\sigma = A + G \cdot \varepsilon, \qquad (1)$$

где σ – приложенное напряжение; ε – деформация; A – константа. Параметр G характеризует интенсивность упрочнения и является оценкой модуля упругости образцов. Результаты аппроксимации линейных участков $\sigma - \varepsilon$ приведены в табл. 1–3. В таблицах указаны также предел текучести, предел прочности, пластичность и коэффициент линейной корреляции, который близок к единице, что свидетельствует о высокой надежности оценок параметров A, G. Пластичность $\Delta\varepsilon_{пл}$ характеризует протяженность пластической области и может быть оценена по разнице между деформациями, соответствующими пределу прочности и текучести (протяженность между синей и красной линиями по оси абсцисс рис. 2). Пластичность оценивалась по формуле

$$\Delta\varepsilon_{пл} = \Delta\varepsilon_{л} + \Delta\varepsilon / G, \qquad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_{л}$ – разность деформаций на линейных зависимостях, проходящих на пределе текучести и пределе прочности при нулевом напряжении; $\Delta\varepsilon$ – текущий прирост деформаций.

Для проведения количественного фазового состава использовались образцы с плоской гранью и размером 20×20×10 мм. Анализировались цементные образцы с мелко- и крупнозернистым песком после 8-часовой выдержки при комнатной температуре. Дифракционные исследования цементного камня проводились на ДРОН4-07, который был модифицирован к цифровой обработке сигнала. Съемки производились на медном излучении (K_α) по схеме Брегга – Брентано с шагом 0,02° и временем экспозиции в точке 1 с в угловом диапазоне 17–92°.

Механические испытания при комнатной температуре

На рис. 2 приведены типичные кривые деформации исследуемых образцов. Из рисунка видно, что кривые течения имеют сложный вид. На зависимостях напряжение – деформация бетонных образцов выделяются участки с переходной областью, линейный участок и интервалы пластической деформации и разрушения. Переходная и упругая области составляют основную долю от общей деформации. Протяженность пластической области на кривых $\sigma - \varepsilon$ незначительна (вдоль оси абсцисс), однако прирост напряжений от предела текучести и до предела прочности оказывается существенным. Анализ механических свойств бетонных кубиков свидетельствует о том, что с увеличением размера зерен наполнителя заметно возрастают предел текучести, предел прочности, модуль упругости до значений, близких к рабочим характеристикам эксплуатации бетонных изделий [1] (табл. 1, 2). Рост физико-механических свойств в указанной серии испытаний сопровождается некоторым снижением пластичности как в упругой, так и пластической областях деформации (табл. 2). Под действием внешних напряжений наблюдается хрупкое разрушение бетонных образцов. Таким образом, использование песка большего размера в исходных цементных образцах приводит к существенному росту прочностных характеристик. Наблюдается увеличение напряжений, интенсивности упрочнения, а также предела прочности.

Механические испытания образцов после температурного вылеживания

Методика температурного вылеживания 48 бетонных образцов приведена на рис. 1. Механические характеристики образцов и их номера представлены в табл. 3. Анализ механических характеристик кривых $\sigma - \varepsilon$ показывает, что с увеличением времени выдержки существенно возрастают модуль упругости, предел текучести и прочности бетонных образцов как с мелко-, так и крупнозернистым песком. Для всех образцов характерна низкая (меньше одного процента деформации) пластичность (табл. 3). В бетонных образцах с крупнозернистым песком пластичность оказывается меньше по сравнению с мелкозернистым наполнителем. Наиболее интенсивное нарастание прочности образцов наблюдается в условиях изотермической выдержки, а также последующей сушки в шкафу. В высушенных бетонных образцах достигаются максимальные значения прочности, предела текучести и модуля упругости, которые соответствуют рабочим характеристикам цементных изделий. Необходимо отметить также, что в образцах с крупнозернистым песком прочностные характеристики существенно выше при всех исследуемых температурах

по сравнению с мелкозернистым песком. В частности, модули упругости образцов с крупнозернистым песком выше. Однако в процессе выдержки интенсивность накопления упругих модулей в образцах с мелкозернистым песком выше (рис. 3).

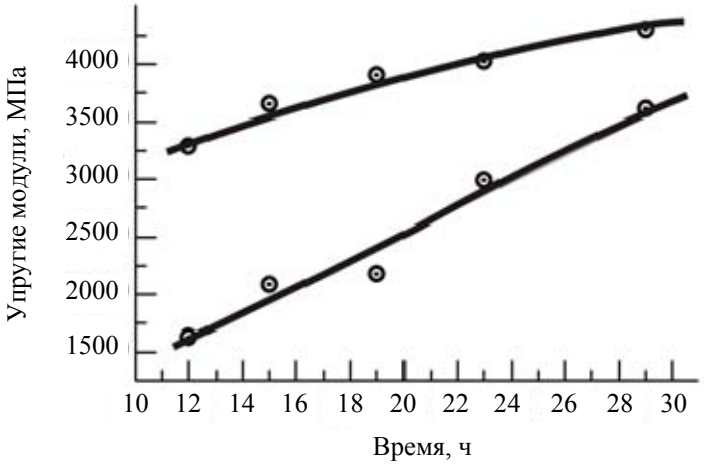


Рис. 3. Зависимость упругих модулей от времени температурной выдержки цементных образцов:
верхняя кривая – крупнозернистый песок; нижняя кривая – мелкозернистый песок

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют также о том, что при изотермических испытаниях при повышенных температурах в образцах достигаются рабочие прочностные характеристики за значительно более короткое время по сравнению с вылеживанием образцов при комнатной температуре. Изотермические испытания модельных образцов при повышенных температурах сокращают время накопления прочности до служебных значений в процессе вылеживания до 30 ч. При традиционных технологиях рабочие характеристики достигаются за 28 сут. Таким образом, температурная выдержка бетонных образцов по методике температурного прогрева, которая представлена на рис. 3, приводит к существенной интенсификации накопления прочностных характеристик. К концу температурных испытаний образцы достигают рабочих характеристик в бетонных изделиях. Применение крупнозернистого песка в изделиях приводит к повышенным характеристикам прочности по сравнению с мелкозернистым песком.

Таблица 1

Механические свойства бетонных кубиков с крупнозернистым песком

Параметры кривых деформации	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
A	–10,12	–32,02	–38,69	–44,46	–34,63	–16,25

Окончание табл. 1

Параметры кривых деформации	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
G (МПа)	3294,04	3953,88	3755,81	3341,21	4243,61	4019,709
R	0,99972	0,9997	0,99939	0,99946	0,99968	0,99982
σ_0 (МПа)	36,56	41,16	40,10	38,39	44,39	42,18
$\sigma_{пр}$ (МПа)	44,014	48,21	52,28	45,41	52,52	50,59
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,0027	0,0017	0,0022	0,00203	0,0017	0,0024

Примечание. Средние значения механических характеристик:
$\langle G\rangle = 3768{,}04 \pm 382{,}38$ МПа, $\langle\sigma_0\rangle = 40{,}46 \pm 2{,}77$ МПа, $\langle\sigma_{пр}\rangle = 48{,}84 \pm 3{,}57$ МПа $\langle\Delta\varepsilon_{пл}\rangle = 0{,}0021$.

Таблица 2

Механические свойства бетонных кубиков с мелкозернистым песком

Параметры кривых дефор-мации	Номер образца								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	–17,57	–14,94	–120,84	–98,18	–11,55	–28,44	–32,24	–7,60	–56,73
G (МПа)	3141,27	3121,28	3861,53	3236,75	3902,78	3982,19	4086,57	4054,80	4474,81
R	0,9995	0,99982	0,99934	0,99844	0,9998	0,99957	0,99938	0,99986	0,99961
σ_0 (МПа)	36,461	34,844	36,032	34,024	35,248	32,879	34,934	36,506	42,139
$\sigma_{пр}$ (МПа)	42,035	39,84825	45,5796	40,98311	45,20347	41,77524	46,78483	44,65094	51,14027
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,00209	0,0021	0,00204	0,00205	0,00212	0,00206	0,0017	0,00205	0,00204

Примечание. Средние значения механических характеристик:
$\langle G\rangle = 3372 \pm 825{,}77$ МПа, $\langle\sigma_0\rangle = 33{,}67 \pm 4{,}63$ МПа, $\langle\sigma_{пр}\rangle = 41{,}39 \pm 5{,}60$ МПа $\langle\Delta\varepsilon_{пл}\rangle = 0{,}00228$.

Таблица 3

Механические свойства бетонных образцов

Параметры кривых деформации	Номер образца											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
G (МПа)	3635,08	3582,50	2948,53	2751,46	834,40	2669,17	3164,65	3141,78	3256,24	3264,612	2980,11	2473,75
σ_o (МПа)	34,87	30,89	25,77	28,35	18,46	28,35	27,95	25,18	33,44	26,77	30,13	23,49
$\sigma_{пр}$ (МПа)	41,83	38,49	33,79	34,22	20,45	32,07	33,33	31,62	37,37	31,44	34,31	30,08
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,00202	0,0028	0,00741	0,00245	0,00588	0,00176	0,00278	0,00314	0,00349	0,00389	0,00208	0,00426

Продолжение табл. 3

Параметры кривых деформации	Номер образца											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
G (МПа)	2232,53	3365,39	2311,30	641,25	845,55	690,41	2731,06	3282,77	1611,1	3422,18	3878,67	4121,94
σ_o (МПа)	30,81	29,74	28,83	8,31	15,18	12,75	32,89	28,35	26,30	31,48	42,75	44,09
$\sigma_{пр}$ (МПа)	34,01	35,20	30,34	13,54	20,18	17,39	36,17	34,75	27,91	38,53	48,44	50,89
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,00243	0,0028	0,00176	0,01861	0,0112	0,01336	0,00242	0,00424	0,00174	0,00313	0,00206	0,00211

Продолжение табл. 3

Параметры кривых деформации	Номер образца											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
G (МПа)	3612,42	3975,03	3748,05	3970,03	4356,37	3701,48	4302,69	1184,83	4038,15	2931,20	3727,43	3153,88
σ_o (МПа)	47,35	45,95	47,36	47,06	49,81	52,26	52,61	12,99	49,81	38,99	33,88	35,17
$\sigma_{пр}$ (МПа)	59,27	58,10	54,49	53,90	59,34	63,96	60,49	17,64	60,87	48,54	41,49	40,08
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,00309	0,00344	0,00212	0,00204	0,00241	0,00241	0,00235	0,00516	0,00271	0,00406	0,00379	0,00133

Окончание табл. 3

Параметры кривых деформации	Номер образца											
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
G (МПа)	4381,71	4166,60	4168,73	4227,85	4151,18	4722,93	2084,68	855,91	3317,23	4595,42	3960,10	4354,57
σ_o (МПа)	61,04	48,26	44,99	46,16	40,79	49,29	27,56	11,07	29,80	56,22	37,11	47,35
$\sigma_{пр}$ (МПа)	70,87	56,08	52,26	55,67	49,47	58,27	33,22	19,79	36,96	68,62	43,10	57,14
$\Delta\varepsilon_{пл}$	0,00271	0,0021	0,00209	0,00207	0,00312	0,00241	0,00348	0,00302	0,00278	0,00278	0,00172	0,00245

Анализ структуры крупно- и мелкозернистых бетонных образцов

Качественная идентификация структурного состояния бетонных кубиков с разным размером песка производилась на основе кристаллографических данных цементных материалов COD [5]. С использованием базы COD были установлены эталонные фазы, соответствующие высоким значениям критерия FOM [3, 4]. Список 14 фаз приведен в табл. 4, в которой указаны также номера карточек структур базы COD, химические формулы, параметры решеток, пространственная группа и класс. Эталонные структуры (табл. 4) применялись для определения количественного содержания фаз методом Ритвельда. В методе Ритвельда рассчитывается интенсивность на основе структурных данных решеток [2–4, 6], оценивается их вклад в интегральную интенсивность $I_{\text{расч}}(2\theta)$. Степень близости $I_{\text{расч}}(2\theta)$ к экспериментальной $I_{\text{эксп}}(2\theta)$ оценивается по относительной разности $I_{\text{расч}}(2\theta)$ и $I_{\text{расч}}(2\theta)$ с помощью критерия R_{p} [3].

Таблица 4

Список исходных эталонных фаз

№ п/п	Номер карточки	Хим. формула	*a*, нм	*b*, нм	*c*, нм	α, град	β, град	γ, град	Пространств. группа и класс
1	96-101-0988	$4\cdot[Al_2O_3\cdot SiO_2]$	0,7090	0,7720	0,5560	90,09	101,03	105,74	P-1 Triclinic
2	96-101-1098	SiO_2	0,4913	0,4913	0,5404	90	90	120	P321 Trigonal
3	96-101-1173	SiO_2	0,4913	0,4913	0,5405	90	90	120	P321 Trigonal
4	96-101-1205	$O_{28}Al_9Si_8$	0,7430	0,7580	0,5740	90	90	90	Pmmm Ortho-rhombic
5	96-900-1746	$O_{64}Al_8Si_{16}Ca_8$	0,8789	0,5843	1,3127	90	90	90	CmCm Ortho-rhombic
6	96-900-6694	$O_{28}Al_5Si_2Ca_4$	0,54223	0,54223	1,27041	90	90	120	P6/mmm Hexagonal
7	96-901-1223CaO3Si	$12\cdot[CaO\cdot SiO_2]$	0,6853	1,1895	1,9674	90,12	90,55	90,00	P-1 Triclinic
8	96-901-2891	$6\cdot[CaO\cdot SiO_2]$	0,7940	0,7320	0,7070	90,030	95,37	103,43	P-1 Triclinic
9	96-901-6019	$\sim 2\cdot[Al_2O_3\cdot CaO\cdot Fe_2O_3]$	0,5324	1,4438	0,5545	90	90	90	Ima2 Ortho-rhombic
10	96-100-1769	$Ca(OH)_2$	0,3589	0,3589	0,4911	90	90	120	P-3m1 Trigonal
11	96-900-0286	$4\cdot[3CaO\cdot SiMgO_3]$	1,3254	0,5293	0,9328	90	91,90	90	P2/m Monoclinic
12	96-900-8367	$36\cdot[3CaO\cdot SiO_2]$	3,3083	0,7027	1,8499	90	94,12	90	Cm Monoclinic
13	96-900-9266	$9\cdot[3CaO\cdot SiO_2]$	0,7078	0,7078	2,4940	90	90	120	R3m Hexagonal
14	96-901-2682	$\sim 8\cdot[CaO\cdot SiO_2]$	0,50739	1,12113	0,67534	90	90	90	Pmmm Ortho-rhombic

В соответствии с выбранной стратегией уточнение структурных, профильных, инструментальных параметров, входящих в теоретическую интенсивность, осуществляется нелинейным методом наименьших квадратов. В работе количественный фазовый анализ (КФА) методом Ритвельда осуществлялся с использованием пакета Reflex [4]. В эталонных структурах подвергались уточнению пространственное распределение атомов в решетках фаз при заданных значениях параметров решетки, профильные параметры рефлексов, смещение нуля, фоновая интенсивность и т. д. Для каждого этапа в рамках молекулярной динамики контролировалась стабильность решеток фаз. Результаты КФА приведены на рис. 4, 5. При КФА была достигнута хорошая степень сходимости интегральной интенсивности к экспериментальной для бетонных образцов в исходном состоянии с мелко- и крупнозернистым наполнителем. Критерии сходимости оказались равными R_p = 11,22 и 11,69 % соответственно, и они указывают на незначительную разницу между интенсивностями. Фазовый анализ позволил определить список фаз, которые вносят основной вклад в интегральную интенсивность. Результаты количественного фазового анализа и список обнаруженных основных фаз в цементном камне приведены в табл. 5. В таблице количественное содержание фаз оценено по относительному вкладу в интегральную интенсивность.

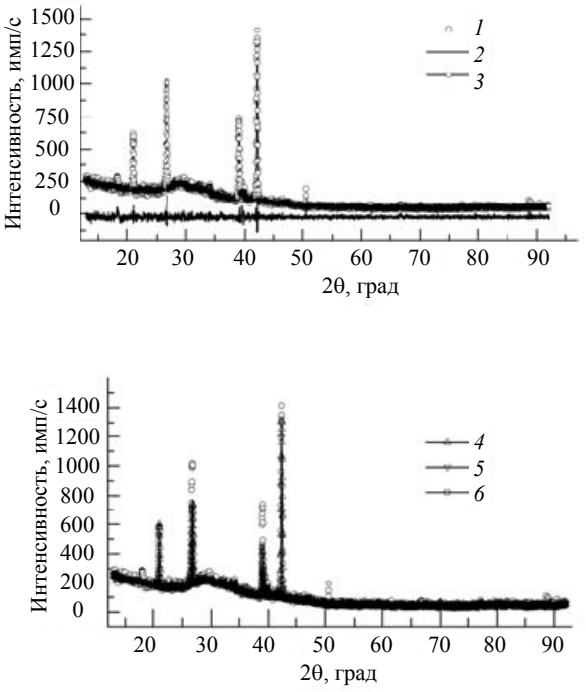


Рис. 4. Количественный фазовый анализ бетонных образцов с мелкозернистым наполнителем:
1 – экспериментальная дифрактограмма; *2* – теоретическая дифрактограмма; *3* – разность между теоретической и экспериментальной дифрактограммами. Теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *4* – SiO_2, *5* – $AlO_3{\cdot}SiO_2$, *6* – $Al_2O_3{\cdot}SiO_2$

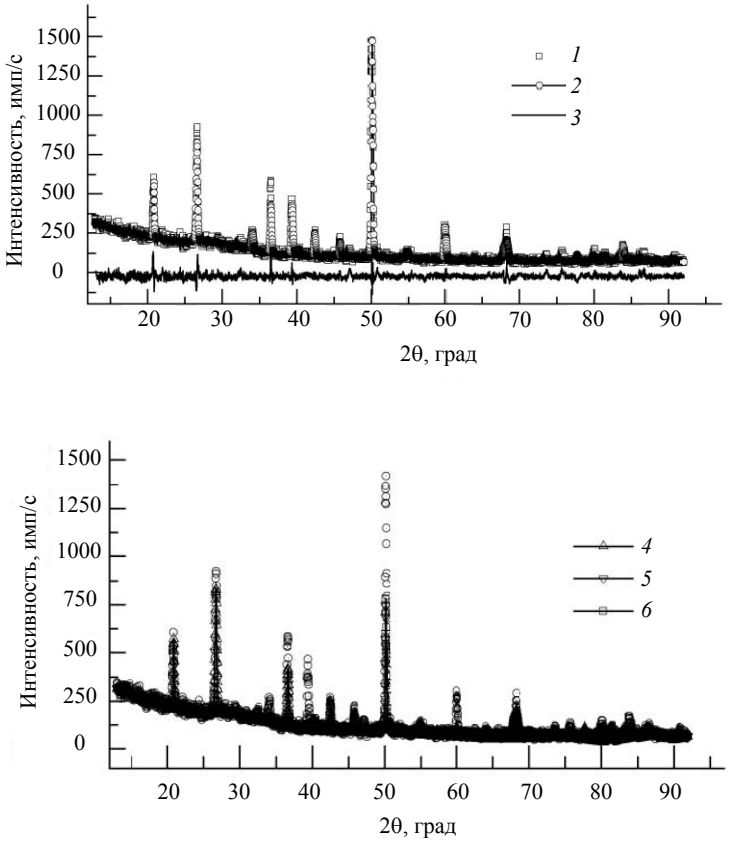


Рис. 5. Количественный фазовый анализ бетонных образцов с крупнозернистым наполнителем:
1 – экспериментальная дифрактограмма; *2* – теоретическая дифрактограмма; *3* – разность интенсивностей теоретической и экспериментальной дифрактограмм. Теоретические дифрактограммы отдельных фаз: *4* – SiO_2; *5* – $CaO{\cdot}H_2{\cdot}SiO_2$; *6* – $Al_2O_3{\cdot}SiO_2$

Из анализа результатов (табл. 5) следует, что $I_{эксп}(2\theta)$ в исходном состоянии представляет собой суперпозицию вкладов интенсивностей от следующих структур: а) $[Ca(OH)_2]$, $[SiO_2]$, $[3CaO{\cdot}MgO{\cdot}SiO_2]$, $[3CaO{\cdot}SiO_2]$ и $[CaO{\cdot}SiO_2]$ в случае крупнозернистого песчаного наполнителя; б) $[Al_2O_3{\cdot}SiO_2]$, $[SiO_2]$, $[O_{28}Al_9Si_8]$, $[O_{28}Al_5Si_2Ca_4]$ и $[Al_2O_3{\cdot}CaO{\cdot}Fe_2O_3]$ для мелкозернистого наполнителя. Доли объясненной суммарной интенсивности указанных фаз близки к единице для каждого состояния и равны 91,56 и 92,87 % соответственно, что свидетельствует о сравнительно высокой достоверности результатов КФА бетонных образцов. Как видно из табл. 5, в образцах доминирует вклад в интенсивность от SiO_2 (песок). Бетонные образцы с разным наполнителем в процессе твердения (комнатная температура) состоят из разного состава промежуточных фаз, что свидетельствует о существенном различии механизмов твердения бетонных образцов.

Таблица 5

Результаты количественного фазового анализа полнопрофильным методом

№ п/п	Крупнозернистый наполнитель			Мелкозернистый наполнитель		
	Номер карточки	Хим. формула фазы	Доля интенсивности, %	Номер карточки	Хим. формула фазы	Доля интенсивности, %
1	96-100-1769	$Ca(OH)_2$	12,86	96-101-0988	$4\cdot[Al_2O_3\cdot SiO_2]$	36,57
2	96-101-1173	SiO_2	50,68	96-101-1098	SiO_2	40,68
3	96-900-0286	$4\cdot[3CaO\cdot MgO\cdot SiO_2]$	9,73	96-101-1205	$O_{28}Al_9Si_8$	12,76
4	96-900-8367	$36\cdot[3CaO\cdot SiO_2]$	2,85	96-900-6694	$O_{28}Al_5Si_2Ca_4$	2,86
5	96-900-9266	$9\cdot[3CaO\cdot SiO_2]$	4,45	96-901-6019	$2\cdot[Al_2O_3\cdot CaO\cdot Fe_2O_3]$	0,003
6	96-901-2682	$\sim 8\cdot[CaO\cdot SiO_2]$	10,99	–	–	–

Результаты КФА в цементных образцах свидетельствуют о том, что использование разного песчаного наполнителя приводит к существенной вариации механизмов твердения. В случае мелкозернистого наполнителя в механизмах кристаллизации интенсивно участвует оксид Al_2O_3 и в существенно меньшей степени оксид CaO, который присутствует в образцах с крупным песком. Минерал Al_2O_3 образует с SiO_2 различные промежуточные продукты реакций в форме суперячеек $Al_2O_3\cdot SiO_2$, $O_{28}Al_9Si_8$ и $O_{28}Al_5Si_2Ca_4$, причем вклад последнего продукта в интенсивность составляет незначительную величину ~ 2,86 %. Низкую долю составляет также промежуточный продукт формирования четырехкальциевого алюмоферрита $Al_2O_3\cdot CaO\cdot Fe_2O_3$ (0,003 %). В бетонных образцах с крупнозернистым наполнителем в существенно большей степени обнаруживаются стабильные фазы $3CaO\cdot SiO_2$ (алит) и продукт $8\cdot[CaO\cdot SiO_2]$. Минерал $Ca(OH)_2$ является продуктом реакции формирования алита. Для образцов с крупнозернистым наполнителем ожидается большая твердость по сравнению с образцами с мелкозернистым песком.

Таким образом, количественный фазовый анализ цементного камня на основе метода Ритвельда показал, что в бетонных образцах с разным наполнителем обнаруживаются разные механизмы твердения, связанные с различными механизмами кристаллизации фаз при вылеживании. Прежде всего, это связано с разной интенсивностью кристаллизации фаз и, как следствие, приводит к перераспределению состава основных фаз в цементных образцах. Было установлено, что доля аморфной фазы в цементном камне составляет существенную величину.

Библиографический список

1. *Гныря, А.И.* Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря, С.В. Коробков. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 412 с.
2. *Full phase analyses* of Portland clincer by penetrating synchrotron powder diffraction / A. Torre, A. Cabeza, A. Calventa [etc.] // Anal. Chem. – 2001. – № 2. – V. 73. – P. 151–156.
3. *Основы* рентгеноструктурного анализа в материаловедении / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потекаев, О.Г. Волокитин. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 275 с.
4. *Полнопрофильный* рентгеноструктурный анализ клинкерного минерала C4AF / Ю.А. Абзаев, Ю.С. Саркисов, А.А. Клопотов, В.Д. Клопотов, Д.А. Афанасьев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 200–209.
5. *CrystallographyOpenDatabase* : [официальный сайт]. – Условия доступа : www.crystallography.net
6. *Whitfield, P.S.* Quantitative Rietveld analyses of the amorphous content in cements and clincers / P.S. Whitfield // Journal of Material Science. – 2003. – № 21. – V. 38. – P. 4415–4421.

References

1. *Gnyrya A.I., Korobkov S.V.* Tekhnologiya betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh [Technology concrete work in winter conditions]. Tomsk : TSUAB Publ., 2011. 412 p. (rus)
2. *Torre A., Cabeza A., Calventa A., et al.* Full phase analyses of Portland clinker by penetrating synchrotron powder diffraction. Anal. Chem. 2001. No. 2. V. 73. Pp. 151–156.
3. *Klopotov, A.A., Abzaev Y.A., Potekaev A.I., Volokitin O.G.* Osnovy rentgenostrukturnogo analiza v materialovedenii [Fundamentals of X-ray analysis in materials science]. Tomsk : TSUAB Publ., 2012. 275 p. (rus)
4. *Abzaev Y.A.*, *Sarkisov Yu.S., Klopotov A.A., Klopotov V.D., Afanas'ev D.A.* Polnoprofil'nyi rentgenostrukturnyi analiz klinkernogo minerala S4AF [Full-profile X-ray analysis of clinker mineral C4AF]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2012. No. 4. Pp. 200–210. (rus)
5. C*rystallographyOpenDatabase.* Available at : www.crystallography.net
6. *Whitfield P.S.* Quantitative Rietveld analyses of the amorphous content in cements and clinkers. *Journal of Material Science.* 2003. No. 21. V. 38. Pp. 4415–4421.

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.16 : 667.622.117.225

УСОВА НАДЕЖДА ТЕРЕНТЬЕВНА, канд. техн. наук,
usovant@tpu.ru
Лицей при Томском политехническом университете,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
ЛУКАШЕВИЧ ОЛЬГА ДМИТРИЕВНА, докт. техн. наук, профессор,
odluk@yandex.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ПОЛУЧЕНИЕ ПИГМЕНТОВ ИЗ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ ВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Разработан и экспериментально проверен способ получения железооксидных пигментов из железосодержащего шлама водоподготовки. Определены физико-химические свойства полученного пигмента. Выполнена сравнительная оценка качества кирпично-красного железооксидного пигмента с широко известным железным суриком марки Г, изготавливаемым в промышленности. Предложена для практической реализации технологическая схема, позволяющая получить высококачественные железооксидные пигменты с разными цветовыми характеристиками для использования в строительной отрасли.

Ключевые слова: железосодержащий шлам; водоподготовка; железооксидные пигменты; утилизация отходов.

NADEZHDA T. USOVA, PhD,
usovant@tpu.ru
Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia
OL'GA D. LUKASHEVICH, DSc, Professor,
odluk@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

PIGMENTS PRODUCED FROM IRON-CONTAINING SLUDGE AND THEIR USE IN CONSTRUCTION INDUSTRY

The paper presents a new method of producing pigments from iron-containing sludge, and physicochemical properties of pigment obtained are determined. A comparison was carried out between the quality of a brick-red iron oxide pigment and a widespread type G red iron oxide of industrial production. The process flow sheet is suggested to produce high-quality iron oxide pigments of diverse color characteristic that can be used in construction industry.

Keywords: iron-containing sludge; water treatment; iron oxide pigments; recycling.

Синтетические железооксидные пигменты широко используются во многих отраслях промышленного производства. Они характеризуются широкой цветовой гаммой, высокой окрашивающей способностью, хорошей химической стойкостью, высокой устойчивостью к атмосферно-климатическим условиям. Привлекательны также их токсикологическая безопасность и относительно низкая цена. Важным преимуществом оксидов железа по сравнению со многими органическими пигментами является их термическая стабильность при температурах переработки большинства полимеров [1]. По химической природе они являются моногидратом окиси железа FeO(OH). Наибольшее значение имеет моногидрат α-формы (гетит) – желтый железооксидный пигмент. Красные железооксидные пигменты могут иметь оттенки от оранжево-красного до малинового и пурпурного. Различие оттенков зависит от способа получения и обусловлено только физическим состоянием частиц – их формой и размером. При переходе от светлых оттенков к темным размер частиц увеличивается от 0,35–0,45 мкм для светлых оттенков, 0,50–0,70 мкм – для средних и 1,0–1,5 мкм – для малиновых. Форма частиц светлых тонов игольчатая, пластинчатая; темных – зернистая. По химическому составу красные железооксидные пигменты представляют собой оксид железа Fe_2O_3 в двух кристаллических структурах: α-формы – гематита (гексагональной системы) и γ-формы – маггемита (кубической системы). Пигменты γ-Fe_2O_3 имеют коричневый цвет.

В настоящее время основная часть железооксидных пигментов, используемых в России, ввозится из-за рубежа: Чехии, Германии, Китая. Данный факт объясняется дефицитом железооксидных пигментов отечественного производства на российском рынке, что, несомненно, делает актуальной задачу получения пигментов из железосодержащих отходов.

Цель работы – получение и изучение свойств железооксидных пигментов из шламов водоподготовки.

Известны способы получения железооксидных пигментов с использованием в качестве исходного сырья шламов скважинной гидродобычи железных руд [2], металлургических отходов и отработанных при травлении сталей солянокислых растворов [3, 4], отработанных железосодержащих катализаторов [5], отходов водоподготовки [6, 7].

Способ получения железооксидных пигментов по авторскому свидетельству [3] включает термическое разложение исходного солянокислого раствора при температуре сгорания горючего газа в токе воздуха 480–750 °C

и промывку пигмента паровым конденсатом. В зависимости от температуры в зоне разложения получают пигменты красного и сиреневого цвета.

По способу [4] для получения красного пигмента металлургический оксид железа подвергают мокрому помолу при его концентрации 500–900 г/дм^3 в присутствии нейтрализующего агента, проводят его отмывку от водорастворимых солей с образованием водной суспензии оксида железа с pH = 6–10. Затем суспензию оксида фильтруют и подвергают сушке.

Для получения железооксидного пигмента с использованием в качестве исходного сырья отработанного железооксидного катализатора – отхода процессов дегидрирования олефиновых или алкилароматических углеводородов [5] – предложено прокаливать его в среде водяного пара при 600–670 °С в течение 1–3 ч с последующим охлаждением в среде паровоздушной или пароазотной смеси, взятой в соотношении 35:1–1:35 по весу со скоростью 25–35 °С в час до 200–300 °С, а затем в среде азота и/или воздуха со скоростью 25–35 °С в час до 40–80 °С, производить промывку, сушку и измельчение полученного пигмента. Недостатками способа являются: многостадийность технологии; использование большого количества вспомогательных материалов (воды для промывки, пароазотной смеси); высокая энергоемкость; большая продолжительность работы печей при прокаливании пигмента; охлаждение с программированным снижением температуры в атмосфере газовых смесей определенного состава. Примеси хрома, цинка, молибдена в составе отработанного катализатора не позволяют считать пигмент экологически чистым материалом.

Известен способ использования железосодержащего осадка – отхода водоподготовки для получения сурикоподобного пигмента [6]. Технологическая схема включает очистку грязных промывных вод и извлечение гидрооксидного железа в концентрированном виде, обработку выделенного осадка, измельчение. Густотертую краску из пигмента получали при перемешивании и растирании с олифой. Стадия высокотемпературной обработки при получении пигмента отсутствует, поэтому полученный пигмент имеет желто-коричневый цвет, кроме того, без прокаливания не удаляются загрязняющие примеси. Недостатками этой технологии являются повышенное содержание хлора и органических соединений, ограниченность области применения пигмента.

Использование дешевого вторичного сырья – железосодержащих шламов (ЖСШ) – отходов водоподготовки – дает ряд существенных экономических и технических преимуществ перед другими способами получения пигментов. ЖСШ широко распространены в некоторых северных районах, например, в Западно-Сибирском регионе, где их выделяют перед производственным и хозяйственно-питьевым использованием из подземных вод, которые повсеместно имеют высокое содержание железа. Они являются отходами, загрязняющими окружающую среду, подготовка их к использованию не требует сложной аппаратуры. Достоинствами ЖСШ являются высокодисперсное состояние (минимальный размер частиц 0,02–0,03 мм) и оптимальный химический состав (основу шламов составляет гетит FeOOH), что значительно облегчает протекание химических процессов при термообработке и упрощает все технологические операции при их обработке.

Попытки получения пигмента из шлама водоподготовки в лабораторных условиях авторами [7] показали, что прокаливание высушенного шлама до 400 °С приводит к неконтролируемому подъему температуры в порошке выше 600 °С и спеканию в плотную массу, имеющую черный цвет. При использовании вращающейся печи с электронагревом и автоматическим питателем вибрационного типа при нагревании в температурном интервале 400–450 °С в течение 2 мин удалось получить пигмент кофейного цвета.

Авторами был разработан и экспериментально проверен более простой способ получения высококачественных железооксидных пигментов из железосодержащего шлама водоподготовки с разными цветовыми характеристиками для использования в строительной отрасли. Для получения пигмента исходный шлам с содержанием железа не менее 42 % высушивался, измельчался и обжигался в муфельной печи при температуре выше 600 °С. Для получения коричневого цвета прокаливание осуществляли путем постепенного нагрева высушенного исходного сырья до температуры 600 °С, для получения кирпично-красного цвета нагрев осуществляли до температуры 800 °С, а для получения черного цвета исходное сырье нагревали до температуры 1050 °С.

В строительстве наиболее высоким спросом пользуются красные железооксидные пигменты. Авторами выполнена сравнительная оценка качества кирпично-красного железооксидного пигмента, полученного из железосодержащих шламов водоочистки с широко известным железным суриком марки Г, изготавливаемым отечественной промышленностью. В таблице представлены результаты исследований основных характеристик. Определение физико-химических свойств пигмента проводили по стандартным методикам.

Физико-химические свойства железооксидных пигментов

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя		Метод испытания
		Пигмент из шлама водоочистки	Сурик железный (марка Г)	
1	Внешний вид	Кирпично-красный порошок	Красно-коричневый порошок	Визуальный
2	Массовая доля железа в пересчете на Fe_2O_3, %	70	70	По ГОСТ 8135–74
3	pH водной вытяжки	6,8	6,5–7,5	По ГОСТ 21119.3–91
4	Маслоемкость, г/100 г пигмента	27,5	15– 25	Посредством стеклянной палочки по ГОСТ 21119.8–75
5	Укрывистость, г/м^2	24,4	Не нормируется	Визуальный метод по ГОСТ 8784–75
6	Массовая доля водорастворимых веществ, %	0,3	0,3	Метод горячей экстракции по ГОСТ 21119.2–75

Окончание таблицы

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя		Метод испытания
		Пигмент из шлама водоочистки	Сурик железный (марка Г)	
7	Остаток после мокрого просеивания на сите с сеткой 0,063, %	0,1	0,1–0,3	По ГОСТ 21119.4–75

Испытания показали, что полученный пигмент практически полностью соответствует установленным требованиям на природный пигмент железный сурик ГОСТ 8135–74.

Одной из важнейших характеристик пигмента, влияющих на его качество, является размер и форма частиц. Малые их размеры обеспечивают нормативные маслоемкость, укрывистость, цветовую гамму. Определенная по методу БЭТ площадь удельной поверхности полученного пигмента составила 9,8 $м^2/г$, что соответствует расчетной величине размера частиц 124 нм (0,124 мкм).

Более детально определить структуру и размеры частиц пигмента позволили электронно-микроскопические исследования. Установлено, что частицы пигмента имеют зернистую форму и объединены в конгломераты размером 3–10 мкм (рис. 1).

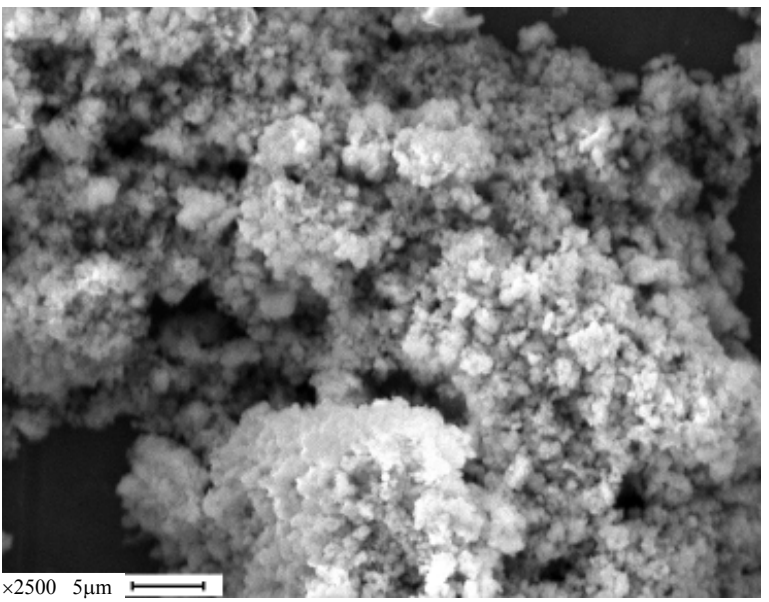
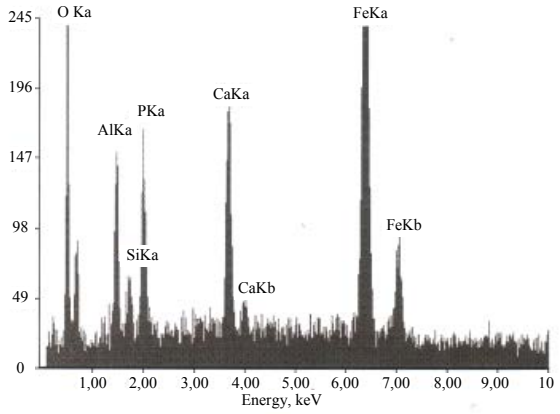


Рис. 1. Микрофотография пигмента

Проведенный микроанализ элементного состава (рис. 2) показал, что в пигменте присутствуют кислородные соединения железа, алюминия, фосфора, кальция, кремния. В массовом составе преобладают концентрации железа (26 %) и кислорода (45 %), что подтверждается данными РФА (рис. 3).



Элемент	Масс. %	Атом. %
O	45,45	66,98
Al	10,53	09,20
Si	03,18	02,67
P	08,58	06,53
Ca	05,97	03,51
Fe	26,29	11,10

Рис. 2. Результаты микроанализа элементного состава полученного пигмента

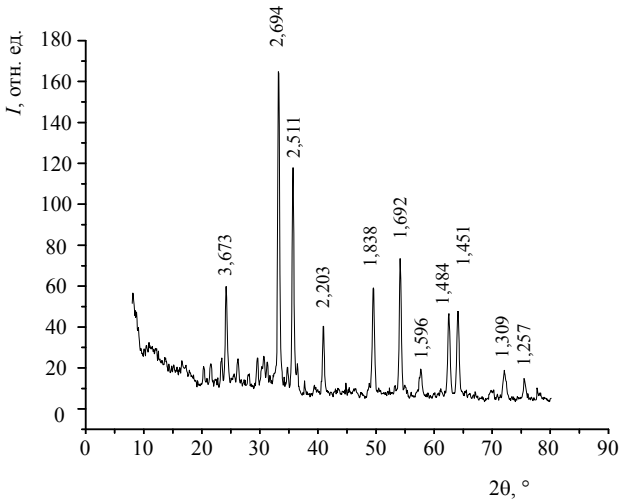


Рис. 3. Дифрактограмма шлама, прокаленного при 800 °С

Для выяснения механизма процессов, происходящих в шламе при обжиге, были проведены термогравиметрические исследования. Согласно данным термического анализа (ДСК/ТГ), выделяются следующие эффекты (рис. 4):

1. В интервале температур 40–200 °С наблюдается эндоэффект с двумя максимумами: слабо выраженным при 100 °С и более четким при 150 °С, сопровождающийся значительным уменьшением массы (–10 %), что соответствует удалению физически и химически связанной воды.

2. Интенсивный экзоэффект в широком интервале температур 200–450 °С с отчетливым максимумом при 301 °С, сопровождающийся плавным уменьшением массы, свидетельствующим о сгорании органической составляющей шлама и кристаллизации аморфной фазы, в результате которой

гетит (α-FeOOH) и лепидокрокит (γ-FeOOH) превращаются соответственно в гематит (α-Fe_2O_3) и маггемит (γ-Fe_2O_3). Данные термического анализа подтверждаются результатами РФА. На рентгенограмме шлама, прокаленного при 600 °С, присутствуют кристаллические фазы указанных оксидов.

3. В температурном интервале 500–800 °С осуществляется переход γ-Fe_2O_3 в термодинамически стабильную фазу α-Fe_2O_3. Экзоэффект с максимумом при 776 °С, по-видимому, свидетельствует о завершении фазового перехода γ-Fe_2O_3→α-Fe_2O_3. По данным РФА прокаливание шлама до 800 °С приводит к образованию закристаллизованного безводного α-Fe_2O_3.

4. Последний экзоэффект с максимумом при 1047 °С протекает без изменения массы и свидетельствует о фазовом переходе гематита в магнетит. Дальнейшее нагревание образца приводит к его плавлению (эндоэффект с температурой максимума 1391 °С) с последующим разложением. Общее уменьшение массы составило 25,47 %.

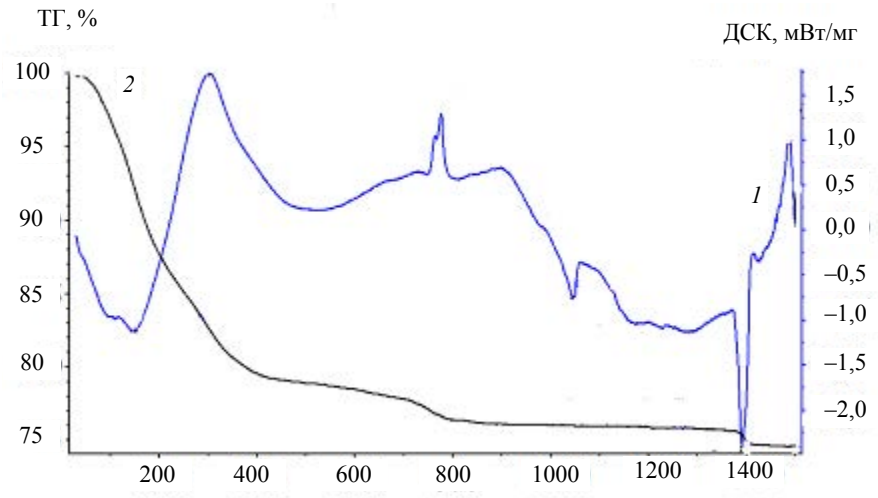


Рис. 4. Термограмма железосодержащего шлама:
1 – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК); *2* – кривая термогравиметрии (ТГ)

Полученные данные позволяют детализировать фазовые ходы и предложить следующую схему, характеризующую процессы, протекающие при термическом воздействии на гетит – главную составляющую железосодержащего шлама:

$$\underset{\textit{желтый}}{FeOOH} \xrightarrow[-H_2O]{200\text{–}450\ ^\circ C} \underset{\textit{коричневый}}{\gamma\text{-}Fe_2O_3} \xrightarrow{500\text{–}800\ ^\circ C} \underset{\textit{кирпично-красный}}{\alpha\text{-}Fe_2O_3} \xrightarrow{1050\ ^\circ C} \underset{\textit{черный}}{Fe_3O_4}$$

Данные термического анализа согласуются с литературными данными авторов [8], указывающих, что переход гетита в гематит в железных рудах

осуществляется через структурно-неупорядоченную фазу γ-Fe_2O_3 согласно схеме:

$$FeOOH \xrightarrow{150–250\ °C} \gamma,\ \alpha\text{-}Fe_2O_3 \xrightarrow{600–800°C} \alpha\text{-}Fe_2O_3 \xrightarrow{800\ °C} Fe_3O_4$$

Таким образом, выявлены температурные интервалы, соответствующие фазовым состояниям кислородных соединений железа, являющихся пигментами разного цвета. Желтый, коричневый, кирпично-красный и черный оттенки могут быть получены путем варьирования условий обжига ЖСШ. Наблюдаемый элементный состав пигмента, высокая дисперсность и красящая способность, отсутствие абразивных примесей, легкая диспергируемость в пленкообразователях, чистый цвет, свето- и атмосферостойкость создают широкие возможности для его применения в производстве высококачественных красок, эмалей, грунтовок на основе любых пленкообразователей, а также для окрашивания в массе полимеров, резин, строительных материалов и изделий.

Предложена технологическая схема получения железооксидных пигментов из шлама станции водоподготовки. Условно процесс получения железооксидных пигментов из ЖСШ можно разделить на следующие стадии: обезвоживания железосодержащего шлама, сушки, прокаливания, измельчения. Технологическая схема приведена на рис. 5.

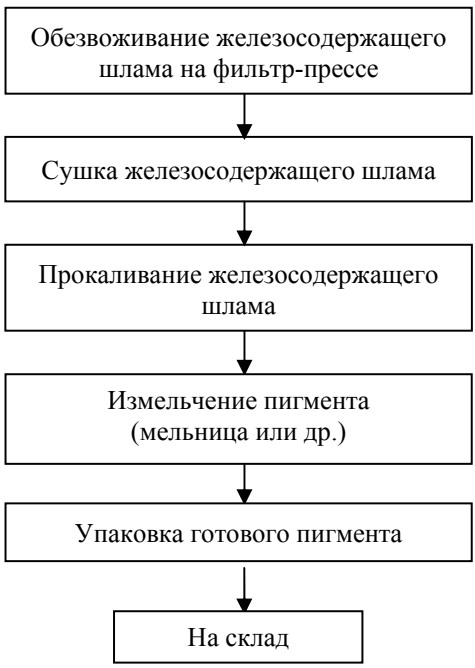


Рис. 5. Технологическая схема получения железооксидных пигментов из шлама станции водоподготовки

Исходный влажный железосодержащий шлам поступает в приемную емкость вакуум-фильтра или фильтр-пресса для снижения влажности с 99 до 50–40 %. Далее полученные коржи шлама направляются на сушку в барабанную сушилку, после чего шлам подается в печь для прокаливания, где происходит его обжиг в интервале температур 600–1050 °С. Выбор температурного диапазона осуществляется в зависимости от нужного цвета получаемого пигмента. Для получения пигмента коричневого цвета прокаливание осуществляют путем постепенного нагрева высушенного исходного сырья до температуры 600 °С, для получения яркого кирпично-красного цвета нагрев осуществляют до температуры 800 °С, а для получения черного цвета исходное сырье нагревают до температуры 1050 °С. После охлаждения до температуры окружающей среды пигмент подвергается измельчению в шаровой мельнице. Полученный порошок пигмента отгружается потребителю.

Технологическая схема позволяет получить высококачественные железооксидные пигменты с разными цветовыми характеристиками для использования в строительной отрасли, упростить технологию производства пигмента с одновременной при этом утилизацией железосодержащего шлама, являющегося отходом водоочистных сооружений.

С экологической точки зрения получаемый пигмент и его технология опасности не представляют. Пигмент не токсичен, пожаро- и взрывобезопасен. В его производстве не применяют токсичных, горючих либо взрывчатых веществ. Отходов производства не образуется.

Выводы

1. Разработан и экспериментально проверен способ получения железооксидных пигментов из шлама водоподготовки путем его обжига в интервале температур 600–800 °С. Выявлены диапазоны температур, варьирование которых позволяет получить желтые, кирпично-красные, коричневые и черные пигменты.

2. Комплексом физико-химических методов анализа установлено, что в составе полученного кирпично-красного пигмента преобладающей фазой является α-гематит. Размеры частиц пигмента составляют 124 нм. Мелкодисперсные частицы в сочетании с более крупным наполнителем могут способствовать упрочнению структуры при использовании пигмента для получения цветных бетонов и других строительных материалов.

3. Исследования физико-химических свойств кирпично-красного пигмента показали, что он полностью соответствует установленным требованиям на природный пигмент – железный сурик.

4. Предложена для практической реализации технологическая схема получения железооксидных пигментов из шлама станции водоподготовки, позволяющая получить высококачественные железооксидные пигменты с разными цветовыми характеристиками для использования в строительной отрасли.

Библиографический список

1. *Беленький, Е.Ф.* Химия и технология пигментов / Е.Ф. Беленький, И.В. Рискин. – Л. : Химия, 1974. – 656 с.
2. *Способ получения железооксидных пигментов*: пат. на изобретение № 2402583 Рос. Федерация / В.С. Лесовик, В.В. Строкова, А.Ф. Нечаев, Т.П. Стрельцова, заявл. от 01.07.2009.
3. *Способ получения железооксидных пигментов*: авт. свидет. на изобретение № 749873 СССР / Н.Ю. Василенко, З.А. Бобошко, А.Д. Юдина, Т.С. Скродская, Л.Д. Шаповалов, В.И. Заяц, И.А. Фрисман, заявл. от 25.04.1979.
4. *Способ получения красного железооксидного пигмента*: пат. на изобретение № 2257397 Рос. Федерация / В.А. Герман, С.А. Сюткин, В.Ю. Первушин, заявл. от 27.11.2003.
5. *Способ получения железооксидного пигмента*: пат. на изобретение № 2117019 Рос. Федерация / Г.Р. Котельников, Е.Г. Степанов, А.В. Кужин, Б.А. Сараев, Е.А. Индейкин, П.И. Кутузов, В.И. Вижняев, Р.Х. Рахимов, заявл. от 30.04.1997.
6. *Дзюбо, В.В.* Технология получения сурикоподобного пигмента и краски на его основе / В.В. Дзюбо, Ю.С. Саркисов – Информ. лист № 50–97. Сер.: Р61.65.31. – Томск : ТМТЦНТИП, 1997. – 4 с.
7. *Лисецкий, В.Н.* Улавливание и утилизация осадков водоподготовки на водозаборах г. Томска. / В.Н. Лисецкий, В.Н. Брюханцев, А.А. Андрейченко. – Томск : Изд-во НТЛ, 2003. – 164 с.
8. *Кузнецова, Т.В.,* Физическая химия вяжущих материалов / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М. : Высш. шк., 1989. – 384 с.

References

1. *Belen'kii E.F., Riskin I.V.* Khimiya i tekhnologiya pigmentov [Chemistry and technology of pigments]. Leningrad : Khimiya Publ., 1974. 656 p. (rus)
2. *Lesovik V.S., Strokova V.V., Nechaev A.F., Strel'tsova T.P.* Sposob polucheniya zhelezooksidnykh pigmentov [Production method for iron oxide pigments]. Pat. Rus. Fed. N 2402583; appl. 01.07.2009. (rus)
3. *Vasilenko N.Yu., Boboshko Z.A., Yudina A.D., Skrodskaya T.S., Shapovalov L.D., Zayats V.I., Frisman I.A.* Sposob polucheniya zhelezooksidnykh pigmentov [Production method for iron oxide pigments]. USSR author's certificate of invention N 749873; appl. 25.04.1979. (rus)
4. *German V.A., Syutkin S.A., Pervushin V.Yu.* Sposob polucheniya krasnogo zhelezooksidnogo pigmenta [Production method for red iron oxide]. Pat. Rus. Fed. N 2257397; appl. 27.11.2003. (rus)
5. *Kotel'nikov G.R., Stepanov E.G., Kuzhin A.V., Saraev B.A., Indeikin E.A., Kutuzov P.I., Vizhnyaev V.I., Rakhimov R.Kh.* Sposob polucheniya zhelezooksidnogo pigmenta [Production method for red iron oxide]. Pat. Rus. Fed. N 2117019; appl. 30.04.1997. (rus)
6. *Dzyubo V.V., Sarkisov Yu.S.* Tekhnologiya polucheniya surikopodobnogo pigmenta i kraski na ego osnove [Production method for red iron ochre-like pigment and color based thereon]. Inform. sheet N 50–97, R61.65.31; Tomsk : TMTTsNTIP Publ., 1997. 4 p. (rus)
7. *Lisetskii V.N., Bryukhantsev V.N., Andreichenko A.A.* Ulavlivanie i utilizatsiya osadkov vodopodgotovki na vodozaborakh g. Tomska [Collecting and utilization of water treatment sediments in Tomsk water channel station]. Tomsk : NTL PUbl., 2003. 164 p. (rus)
8. *Kuznetsova T.V., Kudryashov I.V., Timashev V.V.* Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov [Physical chemistry of cements]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1989. 384 p. (rus)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.139:621.643

ИБРАГИМОВ ЭНВЕР ВАЛЕРЬЕВИЧ, аспирант,
enver_ibragimov1988@mail.ru
КРОНИК ЯКОВ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, профессор,
jakronik@mail.ru
КУПЛИНОВА ЕВГЕНИЯ ВАЛЕРЬЕВНА, магистр,
kupich7@rambler.ru
Московский государственный строительный университет,
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛОГОНАКЛОННЫХ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОВ ГРУНТА

Эффективным способом поддержания или усиления мерзлого состояния грунта является использование низких температур наружного воздуха с помощью парожидкостных термосифонов, называемых термостабилизаторами. При возведении зданий и сооружений, в том числе и резервуаров, с проектным решением полов по грунту при необходимости искусственного закрепления грунтов в условиях вечной мерзлоты целесообразно применять пологонаклонную систему термостабилизации грунтов. На сегодняшний день в конструкции таких термостабилизаторов грунта используются испарители с гладкой стенкой трубы. При использовании гладких труб в пологонаклонных термостабилизаторах хладон вытекает из конденсатора в виде сплошной пленки, а затем в испарителе формируется ручей с той же площадью поперечного сечения. Площадь «мокрой» зоны, где происходит наиболее интенсивный теплообмен, мал по сравнению с внутренней площадью трубы испарителя. Поэтому для интенсификации работы требуется увеличить зону смачивания. Использование новых покрытий внутри испарителей термостабилизаторов позволяет решить данную задачу, что существенно повышает теплопередающие характеристики и эффективность устройств. В настоящей работе проведен и проанализирован эксперимент по сравнению существующих и усовершенствованных конструкций пологонаклонных термостабилизаторов грунта. По результатам данных экспериментальных исследований испарители с внутренним капиллярным покрытием работают более эффективно, чем традиционные гладкие трубы испарителей парожидкостных термостабилизаторов грунта.

Ключевые слова: вечная мерзлота; замораживание грунтов; основания; фундаменты; термостабилизация; системы термостабилизаторов грунта; капиллярно-пористое покрытие.

ENVER V. IBRAGIMOV, Research Assistant,
enver_ibragimov1988@mail.ru
YAKOV A. KRONIK, PhD, Professor,
jakronik@mail.ru
EVGENYA V. KUPLINOVA, Magister,
kupich7@rambler.ru
Moscow State University of Civil Engineering
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES OF INNOVATIVE DESIGN OF SOIL HEAT STABILIZERS

The need for the application of innovative methods and devices to maintain subzero temperatures in frozen soils caused a significant increase in construction of industrial and civil buildings and in oil and gas industry within the Cryolithozone. Low ambient temperatures in maintaining or enhancing the frozen soil state is the efficient way to use vapor-liquid thermosiphons or heat stabilizers. While constructing the ground floor, it is advisable to use flat sloping soil heat stabilizers. Currently, evaporators with smooth pipe walls are used in such heat stabilizers that makes freon to flow out of the condenser in the form of a continuous film. A stream with the same cross-sectional area is then generated in evaporator. The «wet» zone with the most intensive heat exchange is smaller as compared to the inner area of evaporator. Therefore, it is advisable to increase the 'wet' zone. The use of new coatings inside evaporators of heat stabilizers can solve this problem that will significantly improve heat transfer characteristics and performance of devices. The paper presents the analysis and comparison between the existing and improved designs of flat sloping heat stabilizers. It is shown that evaporators with internal capillary coating are more efficient than conventional ones.

Keywords: permafrost; soil freezing; base; foundations; termostabilization; soil heat stabilizer; capillary-porous coating.

Область распространения многолетнемерзлых пород является наиболее перспективным ресурсным регионом страны, без освоения природных богатств которого невозможно представить устойчивое развитие России и мира в целом. Проблема температурной стабилизации (охлаждения и замораживания) грунтов при строительстве капитальных сооружений, скважин, прокладке дорог, путепроводов и трубопроводов в криолитозоне уже в течение многих лет решается применением термостабилизаторов грунта [1].

На собственной производственной базе ОАО «Фундаментпроект» производит термостабилизаторы грунта, которые зарекомендовали себя как весьма эффективные средства охлаждения грунтов оснований и фундаментов промышленных и гражданских зданий и сооружений.

Преимущества применения термостабилизаторов грунта заключаются в следующем:

– снижении затрат на строительство в 3 раза;

– повышении несущей способности оснований и фундаментов в 3–6 раз;

– возможности регулирования и поддержания постоянного температурного режима в основаниях сооружений.

Авторами предлагается следующая классификация термостабилизаторов (ТС) и терморегулирующих устройств, применяемых в строительстве в районах распространения вечномерзлых грунтов (в криолитозоне).

I. По принципу работы ТС выделяются 4 основных типа:

1) охлаждающие устройства с принудительным тепломассопереносом (воздушные, рассольные и тому подобные – однофазные);

2) испарительные (двухфазные);

3) конвективные (с естественным конвективным тепломассопереносом – газовые, жидкостные, газожидкостные);

4) комбинированные с использованием вышеуказанных типов с сезонным или круглогодичным добавлением дополнительных охлаждающих (нагревающих) или терморегулирующих устройств (ТРУ).

II. По типу используемого теплоносителя (хладагента) существуют 4 типа термостабилизаторов: газовые (воздушные), жидкостные, парожидкостные (двухфазные) и газожидкостные (эффект газлифта).

III. По ориентации в пространстве ТС и ТРУ бывают: вертикальные, слабонаклонные (пологонаклонные) и наклонные.

IV. По материалу изготовления ТС и ТРУ бывают: из углеродистой и нержавеющей стали и из алюминиевых сплавов, реже в отдельных случаях используются полиэтиленовые трубы.

V. По конструктивным особенностям, технологиям изготовления и установки существует широкий спектр типов и моделей.

На сегодняшний день основными и наиболее эффективными техническими средствами термостабилизации грунтов являются парожидкостные термостабилизаторы – двухфазные термосифоны, обладающие очень высокой теплопередающей способностью, быстрым темпом вмораживания, изотермичностью по длине, высокой эффективностью охлаждения, удобством транспортировки и монтажа, малыми металлоемкостью и весом [2].

При возведении зданий и сооружений, в том числе и резервуаров с проектным решением полов по грунту, при необходимости искусственного закрепления грунтов в условиях вечной мерзлоты целесообразно применять пологонаклонную систему термостабилизации грунтов.

Пологонаклонные парожидкостные термостабилизаторы[1] представляют собой герметичные сварные металлические сосуды из труб различного диаметра, частично заполненные легкокипящим хладоном, функционально состоящие из трех участков (рис. 1):

1) испаритель – это участок, погруженный в грунт, где происходит теплообмен между жидкой фазой хладона в трубе и грунтом основания через стенки испарителя. В процессе теплообмена хладон переходит в парообразную фазу и поднимается обратно в воздушный конденсатор за счет естественной конвекции;

[1] ТУ 3642-006-01403119–11 (с изм. 1) / ОАО «Фундаментпроект», 2013.

2) транспортный участок, где реализуется транспортировка в противоположных направлениях раздельных потоков жидкой и парообразной фаз хладона;

3) воздушный конденсатор – это участок на открытом воздухе, состоящий из одной или нескольких теплообменных труб с развитой внешней поверхностью (с ребрами) для повышения теплообмена с атмосферным воздухом, где парогазовая смесь конденсируется и стекает вниз по стенкам труб в виде тонкой пленки или отдельных ручейков жидкого хладона.

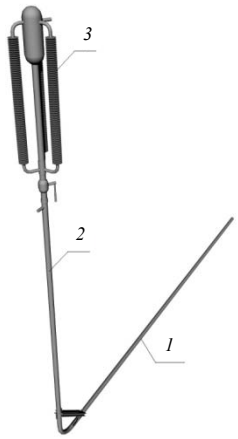


Рис. 1. Пологонаклонный термостабилизатор грунта:
1 – испаритель; *2* – транспортный участок; *3* – конденсатор

Устойчивая тенденция роста объемов применения термостабилизаторов грунта при строительстве в районах распространения вечномерзлых грунтов вынуждает производителей повышать мощностные характеристики изделий, применяя современные технологии и материалы.

На сегодняшний день в конструкции пологонаклонных термостабилизаторов грунта применяются испарители с гладкой стенкой трубы. При использовании гладких труб в пологонаклонных термостабилизаторах хладон вытекает из конденсатора в виде сплошной пленки, а затем в испарителе формируется ручей с той же площадью поперечного сечения.

Схема смешанной двухмерной задачи теплообмена трубы испарителя с окружающим её охлаждаемым (замораживаемым) грунтом представлена на рис. 2. В задаче принимается, что теплообмен между внешней поверхностью трубы испарителя в «условно» сухой зоне *3* с грунтом (поток Q_s) и паром (поток Q_{conv}) осуществляется за счет кондуктивной теплопередачи и с учетом тонкостенной металлической трубы. Температуры грунта Θ_s, наружной $\Theta_н$ и внутренней $\Theta_{вн}$ поверхности трубы приблизительно равны: $\Theta_s = \Theta_н = \Theta_{вн}$. В то же время в нижней «мокрой» зоне *2* (зона ручья хладона) теплопоток от грунта к испарителю Q_s осуществляется за счет кондуктивного теплообмена, внутри трубы через пленку (ручей неопределенной формы) движущегося жидкого хладона и его поверхности происходит испарение (Q_{ev}). Кроме того,

в «мокрую» зону поступает дополнительный тепловой поток от сухой зоны за счет теплопроводности стенки трубы испарителя, который также расходуется на испарение хладона. Температура на внутренней стороне низа трубы $\Theta_{вн.н}$ равна температуре хладона в ручье $\Theta_{хл}$, а температура верхней поверхности ручья равна температуре пара $\Theta_{п}$ [4, 5].

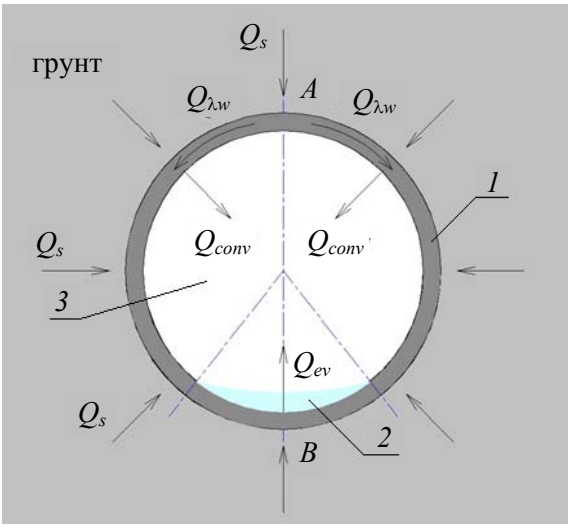


Рис. 2. Схема двухмерной задачи конвективно-кондуктивной теплопроводности в испарителе пологонаклонного термостабилизатора:
1 – труба испарителя ТС; *2* – «ручей» хладона на дне; *3* – парогазовая смесь

Кроме того, решая смешанные задачи внутреннего теплообмена в трубе, необходимо еще учитывать следующие важные факторы:

1) фазовые переходы хладона (при его испарении из жидкой фазы (из ручья и пленки) и при конденсации парогазовой смеси с переходом в жидкую фазу (в пленку и ручей) вдоль внутренней стенки всех элементов термостабилизатора;

2) в смоченной зоне необходимо оценить и учесть часть теплопотока теплопроводности в самой металлической трубе ($Q_{\lambda w}$) от её более теплой «сухой» зоны *3* к нижней «мокрой» зоне *2*. При этом важнейшим условием для постановки и решения такой задачи является знание (возможно, экспериментально определенное) размеров, площадей и форм таких зон *2* и *3*, включая формы и размеры пленок и ручьев, а также установленные из опытов графиков (перепадов) температур в верхней и нижней зонах горизонтальных и вертикальных труб термостабилизатора, что должно стать задачей последующих исследований.

В такой формулировке данной смешанной и сложной задачи (тем более в трехмерной, пространственной постановке внутренней и внешней задач) к настоящему времени отсутствуют не только точные аналитические и приближенные (инженерные и численные) решения, но даже нет упрощенных инженерных постановок аналогичных задач. Ввиду вышеизложенного в пер-

вом приближении авторы полагают более корректным рассмотреть серию приближенных (инженерных) одномерных задач тепломассообмена и простейшие осесимметричные задачи теплообмена и формирования температурных полей в основаниях с термостабилизаторами.

В этой связи на начальных этапах авторы провели первые экспериментальные исследования эффективности существующих термостабилизаторов с обычными трубами и с инновационными конструкциями термостабилизаторов с капиллярно-пористыми покрытиями внутренней поверхности трубы испарителя для интенсификации теплообмена.

В инженерно-технической задаче усовершенствования конструкции пологонаклонного термостабилизатора необходимо было разработать специальные мероприятия по доставке жидкого хладона из зоны *2* (зоны ручья) в верхнюю точку *A* «сухой» зоны *3* (рис. 3) для увеличения площади более эффективного охлаждения и повышения коэффициента теплоотдачи [6].

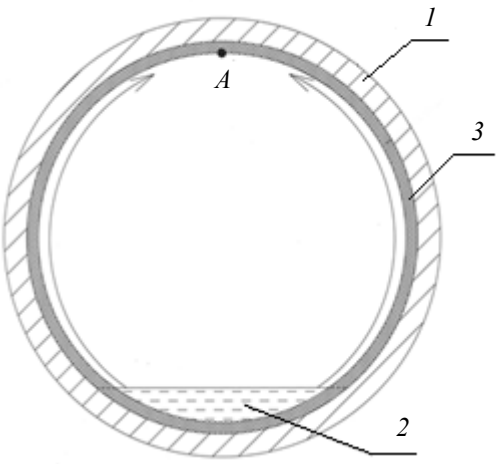


Рис. 3. Схема доставки жидкого хладона к верхней точке испарителя (точка *A*):
1 – труба испарителя; *2* – хладон; *3* – капиллярное покрытие

Для решения данной задачи существуют следующие способы[2]:

1) крепление металлической сетки на внутренней стенке трубы;

2) капиллярная насечка или накатка;

3) создание капиллярно-пористого покрытия путем спекания металлических порошков.

1. Крепление металлической сетки на внутренней стенке трубы.

Этот метод повышения площади охлаждения наименее трудозатратен. Использование мелкоячеистой сетки позволяет получить неплохие результаты капиллярного поднятия хладона. Однако существенным недостатком данной

[2] Изготовление экспериментальной партии образцов труб с капиллярно-пористым покрытием на внутренней поверхности термостабилизаторов грунта: отчет по договору с ОАО «Фундаментпроект» // ООО «ТехИнвест», 2014.

технологии является трудность образования плотного и однородного соприкасания стенок трубы испарителя и сетки. Более того, нередко на строительной площадке требуется произвести изгиб трубы для обхода препятствий (свай, стоек и т. п.), что еще больше повлияет на отслоение сетки.

2. Капиллярная насечка или накатка.

Весьма эффективная технология, используемая в тепловых трубах. Капиллярная насечка или накатка позволяет поднять хладон в верхнюю точку трубы испарителя пологонаклонного термостабилизатора и тем самым образовать «тепловой замок». Однако для нанесения качественного покрытия необходимо произвести целый комплекс токарных работ:

а) по имеющимся данным максимальная длина участка трубы, на котором возможна насечка или накатка на внутреннюю поверхность стенки трубы, составляет 500 мм. Требуется резка заводских труб и, как следствие, большое количество сварных соединений при укрупнении;

б) калибровка (расточка) трубы – процесс длительный. Потребуется черновая и чистовая калибровка. Участок длиной 500 мм займет приблизительно 30 мин времени токаря, т. е. процесс длительный;

в) непосредственно насечка или накатка. Насечка производится быстрее накатки, однако прогнозируется большое количество расходных материалов (резцов).

г) укрупнение образцов до отправочных размеров.

Приблизительная стоимость 1 пог. м такого покрытия – 1200 руб.

К недостаткам известной технологии можно отнести высокие трудозатраты. Ввиду сложности изготовления и большого количества сварных соединений использование этой технологии затруднено.

3. Капиллярно-пористое покрытие в процессе спекания металлических порошков.

Один из наиболее распространенных методов создания капиллярно–пористых покрытий в тепловых трубах. На внутреннюю поверхность трубы в формовочных станках наносится смесь металлического порошка и сорбента, после чего труба подается в конвейерную печь, где происходит спекание.

Преимущества данного метода:

а) технология формования покрытия позволяет подготовить участки труб длиной 2–3 м, что существенно уменьшает количество сварных соединений при сборке термостабилизатора;

б) использование легированных порошков позволит создать антикоррозионное покрытие на внутренней стенке испарителя, что увеличит срок службы и безопасность использования термостабилизатора;

в) кипение на поверхности нагрева, покрытой капиллярно-пористой структурой, начинается при меньших давлениях, чем на гладкой поверхности.

Приблизительная стоимость 1 пог. м такого покрытия – 340–420 руб. (зависит от типа применяемого металлического порошка).

Предлагаемый метод создания капиллярно-пористого покрытия на внутренней стенке трубы испарителя термостабилизатора реализуется путем спекания металлических порошков при температурах, близких к температуре плавления используемого металла. Адгезионная и когезионная прочность

сцепления порошков в слое и с трубой определяется наряду с условиями нанесения, главным образом, температурой, временем изотермической выдержки при спекании и защитной атмосферой в камере печи. Проведенные исследования показали, что, по сравнению с трубами, где используются другие интенсифицирующие теплообмен покрытия, полученные электродуговым и плазменным напылением, механическим креплением сеток, припеканием металловолокнистой структуры, капиллярно-пористые покрытия с заданной структурой пор, изготовленные методом порошковой металлургии, позволяют добиться максимального коэффициента теплоотдачи [3].

Данное покрытие обеспечивает возможность более эффективного охлаждения грунта за счет увеличения площади охлаждения испарительной части термостабилизатора и увеличения коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности.

Чтобы проверить все вышеописанные предпосылки, на опытном производстве (ОП) ОАО «Фундаментпроект» была проведена серия экспериментов по сравнению теплопередающих характеристик испарителя пологонаклонных термостабилизаторов грунта с гладкой поверхностью и с капиллярно-пористым внутренним покрытием.

Результаты анализа структуры и измерений параметров полученного пористого покрытия таковы [4]:

а) толщина покрытия – 100–150 мкм;

б) пористость – 40–45 % .

В лаборатории ОП был собран испытательный стенд, состоящий из двух контуров (рис. 4).

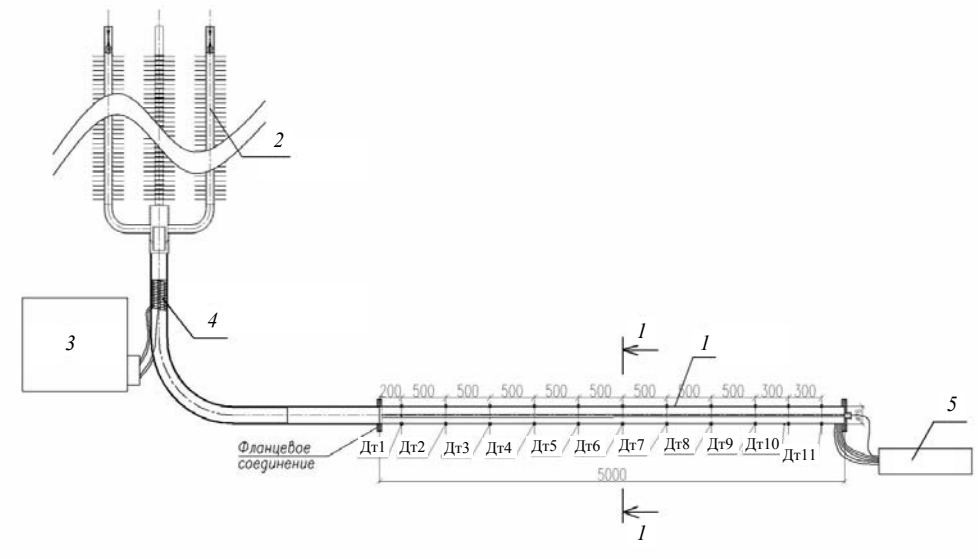


Рис. 4. Схема испытательного стенда (Дт – датчик температурный):
1 – испаритель (длина 5 м); *2* – конденсатор (4 секции); *3* – холодильный агрегат с теплообменником; *4* – испарительный контур холодильного агрегата (в виде спирали из медной проволки); *5* – логгер

В качестве испарителя первого контура использовалась труба Ø76×4 мм с гладкой стенкой и с внутренним капиллярно-пористым покрытием. Длина труб составляла 5 м. Тепловую нагрузку подавали электронагревательными проводами (ПЭН) SEDES ITALY 230V мощностью 360 Вт. В качестве конденсатора использовался четырехсекционный теплообменник. В транспортном участке устанавливался охлаждающий (второй) контур в виде спирали из медной проволки. Охлаждение второго контура осуществлялось посредством холодильного агрегата CAJ 2424 ZBR-SP на базе компрессора CAJ 2424 (*Р*ном = 516 Вт). Транспортный и испарительный участки теплоизолировались изоляцией K-Flex. Коэффициент теплопроводности изоляции 0,036 Вт/(м·К). Толщина изоляции на транспортном участке составляла 13 мм, на испарительном – 26 мм.

Измеряющая аппаратура основана на серийно выпускаемом ОАО «Фундаментпроект» комплексе ИРС-1 (информационно-регистрирующая система для полевого измерения температуры грунтов). Датчики цифровые производства фирмы Даллас (США):

– диапазон измерения температуры грунта от –50 до +120 °С;

– точность измерений составляет 0,3–0,5 °С;

– датчики гидро- и электроизолированны.

Датчики сгруппированы в термокосы (последовательность датчиков, соединенных проводом). Для регистрации температур использовались 5 термометрических кос (ТК). Термометрические косы располагались с внешней стороны. Первая термокоса фиксировала температуру низа трубы, пятая – верха (рис. 5).

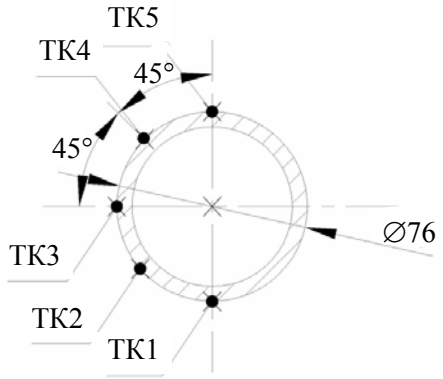


Рис. 5. Разрез 1–1 по термодатчикам № 6. Схема расположения термометрических кос с термодатчиками

Давление в термостабилизаторе регистрировалось манометром Wigam, модель W1HPF80/A6/4/K1, класс 1 (диапазон измерения от –0,1 до 3,5 МПа).

Испытания проводились при одинаковой заправке хладоном (фреон 22) с трехкратной повторяемостью.

После включения холодильного агрегата проводилось нагружение испарителя ПЭНами максимальной тепловой мощностью. Температура испарителя росла, а температура внутреннего контура, наоборот, падала. Начинался

процесс теплообмена, который стабилизировался через некоторый промежуток времени (около 2 ч). Показания давления и температуры регистрировались в интервале 15–20 мин. Опыт считался законченным, когда давление парогазовой смеси хладона внутри термостабилизатора и температура на внешней поверхности испарителя стабилизировались.

На основании полученных данных строились графики, показывающие работу гладкой трубы и трубы с капиллярно-пористым покрытием (рис. 6, *а*, *б*).

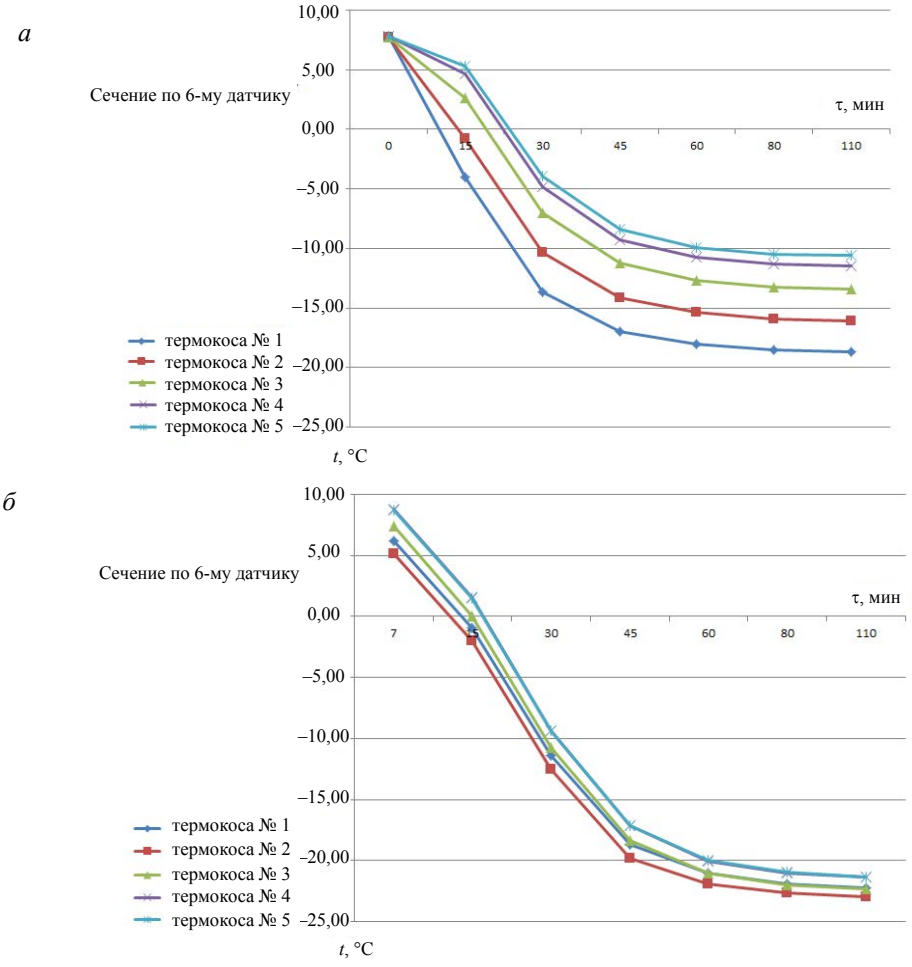


Рис. 6. Показания термометрических кос в сечении 1–1 (см. рис. 4) на гладкой трубе (*а*) и на трубе с капиллярно-пористым покрытием (*б*)

Эти графики показывают зависимость температуры на внешней стенке трубы по её сечению от времени измерения. Для расчета термического сопротивления конструкции брались значения давления и средней температуры на поверхности испарителя в момент стабилизации (110-я мин).

Показание 6-го датчика термокосы № 1 на гладкой трубе в момент стабилизации составило –18,7 °С, а термокосы № 5 –10,6 °С. Разность температур $\Delta t = -10{,}6 - (-18{,}7) = 8{,}1$ °С.

Показание 6-го датчика термокосы № 1 на трубе с капиллярно-пористым покрытием в момент стабилизации составило –22,2 °С, а термокосы № 5 –21,3 °С. Разность температур Δt = –21,3 – (–22,2) = 0,9 °С. Градиент температур в сечении испарителя уменьшился в $\frac{8,1}{0,9} = 9$ раз.

Для гладкой трубы значение давления в момент стабилизации составило P = 0,85 бар, что соответствует температуре конденсации фреона R22 T = –27,0 °С. Средняя температура на испарителе в момент стабилизации $T_{ср}$ = –16,0 °С. Разность температур конденсации и $T_{ср}$ составила ΔT = 11,0 °С. Отсюда получаем термическое сопротивление конструкции R

$$Q = \frac{\Delta T}{R},$$

где Q = 360 Вт;

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = 0,0306 \ {}^{\circ}\text{C}/\text{Вт}.$$

Для трубы с капиллярно-пористым покрытием значение давления в момент стабилизации составило P = 1,05 бар, что соответствует температуре конденсации фреона R22 T = –25,0 °С.Средняя температура на испарителе $T_{ср}$ = –21,8 °С, а разность температур ΔT = 3,2 °С. Соответственно вычисляется термическое сопротивление конструкции R

$$Q = \frac{\Delta T}{R},$$

где Q = 360 Вт;

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = 0,0089 \ {}^{\circ}\text{C}/\text{Вт}.$$

Коэффициент эффективности

$$K = \frac{0,0306}{0,0089} = 3,4.$$

По результатам данных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В традиционных гладких трубах испарителей парожидкостных термостабилизаторов грунта, особенно горизонтальных и слабонаклонных, хладон движется в виде ручья в нижней части трубы, что создает существенно неоднородную зону теплоотдачи от грунта в испаритель с перепадом отрицательных температур на поверхности гладкой трубы до 10–12 °С и более. Это вызывает создание вокруг термостабилизатора не круглоцилиндрической поверхности формирующегося «льдогрунтового цилиндра» (как принято в нормативных теплотехнических расчетах), а сложной пространственной неопределенной конфигурации зоны замораживания грунта, зависящей от конструкции и формы испарителя, вида и формы образующего ручья хладона, от его

температуры и других пока еще не до конца установленных факторов, что требует дополнительных специальных экспериментальных исследований.

2. В экспериментально исследованных трубах испарителя с капиллярно-пористым покрытием внутри трубы испарителя хладон достаточно равномерно распределяется по контуру, обеспечивая относительно однородную среду теплопередачи в грунт с уменьшением перепада отрицательных температур на поверхности трубы, контактирующей с промораживаемым грунтом, до 1–2 °С, т. е. в 6–9 раз меньше, чем в гладкой трубе. Это позволяет при одновременном понижении отрицательной температуры на поверхности испарителя (в среднем на 5–6 °С и более) значительно ускорить процесс замораживания грунта и смыкания «льдогрунтовых цилиндров», близких по форме к круглоцилиндрической, что делает теплотехнические прогнозы термостабилизации грунтов оснований зданий и сооружений более корректными, достоверными и надежными.

3. Использование труб испарителей парожидкостных термостабилизаторов с капиллярно-пористым покрытием позволило в первом приближении получить коэффициент эффективности К = 3,4. Это значит, что внутреннее термическое сопротивление системы с испарителем из труб с капиллярно-пористым покрытием в 3,4 раза меньше, чем из труб с гладкой поверхностью. Соответственно, при том же перепаде температур Δ на конденсаторе и испарителе мы сможем передать в 3 раза больше тепловой энергии, чем при использовании старой конструкции. Продлится и срок работы термостабилизатора в холодный период времени, что увеличит объем льдогрунтового массива.

4. Предлагается использовать капиллярно-пористое покрытие на внутренней поверхности труб испарителей термостабилизаторов и в конструкциях другого типа сезонно-охлаждающих устройств (СОУ).

Библиографический список

1. *Разработка и опыт* устройства термостабилизаторов грунтов с помощью наклонно-направленного бурения / Э.В. Ибрагимов, Р.Г. Гамзаев, М.А. Андреев, И.А. Дорофеева // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2013. – № 2. – С. 21–24.
2. *Сравнительная оценка* эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне / С.И. Голубин, Р.М. Баясан, А.Д. Лобанов, Т.В. Баясан // Инженерные изыскания. – 2012. – № 8. – С. 71–76.
3. *Капиллярно-пористые покрытия* на теплообменных элементах. – Условия доступа : http://www.gubkin.ru/faculty/mechanical_engineering/chairs_and_departments/Uchebn_nauch_proizv_centr_po_remontu/pulver/pulver1.php
4. *Лыков, А.В.* Тепломассообмен: справочник / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
5. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
6. *Дан, П.Д.* Тепловые трубы: [пер. с англ.] / П.Д. Дан, Д.А. Рей. – М. : Энергия, 1979. – 272 с.

References

1. *Ibragimov E.V., Gamzaev R.G., Andreev M.A., Dorofeeva I.A*. Razrabotka i opyt ustroistva termostabilizatorov gruntov s pomoshch'yu naklonno-napravlennogo bureniya [Soil develop-

ment using directional drilling]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2013. No. 2. Pp. 21–24. (rus)

2. *Golubin S.I., Bayasan R.M., Lobanov A.D., Bayasan T.V.* Sravnitel'naya otsenka effektivnosti raboty dvukhfaznykh termosifonov dlya termostabilizatsii gruntov v kriolitozone [Comparison of two-phase thermosifons for heat stabilization of soils in Cryolithozone]. *Engineering Surveys*, 2012. No. 8. Pp. 71–76. (rus)
3. *Kapillyarno-poristye pokrytiya* na teploobmennykh elementakh [Capillary-porous coating in heat exchange elements]. Available at : http://www.gubkin.ru/faculty/mechanical_engineering/chairs_and_departments/Uchebn_nauch_proizv_centr_po_remontu/pulver/pulver1.php
4. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Spravochnik. Izd. 2. Moscow : Energiya, 1978. 480 p. (rus)
5. *Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.* Teploperedacha [Heat transfer]. Moscow : Energiya, 1975. 488 p. (rus)
6. *Dann P.D., Reay D.A.* Heat Pipes. Moscow : Energiya, 1979. 272 p. (transl. from Engl.)

УДК 625.855.4:691.16

ЛУКАШЕВИЧ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
lukvin@tsuab.ru
ЕФАНОВ ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, аспирант,
ein7@yandex.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

АДГЕЗИЯ ВЯЖУЩЕГО ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНАМИ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ СОРБЕНТОВ

Приведены результаты исследований величины адгезии нефтяного битума к поверхностям дисперсной арматуры и минеральных материалов при армировании асфальтобетонов отрезками волокон отработанных сорбентов. Величина адгезии определялась методом кипячения по пятибалльной шкале и по величине краевого угла смачивания битумом поверхностей минеральных материалов и волокнообразующих полимеров. В результате исследований установлено существенное улучшение адгезии битума как к поверхности дисперсной арматуры, так и к поверхности основных и кислых минеральных материалов.

Ключевые слова: асфальтобетон; адгезия нефтяного битума; дисперсная арматура; волокнистые сорбенты; волокнообразующий полимер; угол смачивания; адсорбционные слои нефтяного битума; кольматация.

VIKTOR N. LUKASHEVICH, DSc, Professor,
lukvin@tsuab.ru
IGOR N. EFANOV, Research Assistant,
ein7@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

CEMENT ADHESION AT CONSTRUCTION OF FIBER REINFORCED ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

The paper presents results of investigation of petroleum asphalt adhesion to surfaces of dispersed reinforcement and mineral materials in fiber reinforcing of asphalts obtained from spent sorbents. The amount of adhesion was evaluated by boiling method using the five-mark scale and the value of wetting angle for bitumen surfaces of mineral materials and foam-forming polymers. As a result of investigations, a considerable bitumen adhesion was detected both to dispersed reinforcement and surfaces of base and acid mineral materials.

Keywords: asphalt; petroleum asphalt adhesion; dispersed reinforcement; fiber sorbents; fiber-forming polymer; wetting angle; adsorption layers; colmatage.

Сроки службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, построенных с соблюдением требований действующих нормативных документов, не отвечают потребностям сегодняшних реалий. Нагрузка на дороги зна-

чительно выше установленной в нормативах. Одним из способов повышения качества (и удлинения сроков службы асфальтобетонных покрытий) является дисперсное армирование асфальтобетонных смесей, используемых для устройства этих покрытий.

Дисперсное армирование асфальтобетонов дискретными отрезками химических волокон позволяет улучшить реологические, физико-механические свойства, тем самым снизив вероятность возникновения деформаций асфальтобетонных покрытий. Исследования, проведенные во Франции, Швейцарии, Нидерландах, Польше, США, а также исследования белорусских и российских ученых А.В. Акулича, И.П. Гамеляка, Я.Н. Ковалева, А.Е. Мерзликина, В.И. Соломатова показали, что введение в асфальтобетонную смесь дисперсной арматуры повышает прочность асфальтобетона при сдвиге при температуре 50 °С на 25–30 %, прочность при растяжении при отрицательных температурах – на 40–80 %. Улучшение деформативности при температурах ниже нуля достигает 90–200 %, а наибольшее влияние оно оказывает на усталостную прочность (улучшение достигает 200–500 %) [1–7].

Анализируя мировой опыт, необходимо отметить, что дисперсное армирование, существенно улучшая весь комплекс свойств асфальтобетонов, никоим образом не влияет на величину адгезии и свойства битумных пленок, характеристики которых имеют определяющее значение в процессах старения асфальтобетонов. В частности, в работах белорусских и российских ученых отмечено, что дисперсную арматуру необходимо обрабатывать поверхностно-активными веществами для улучшения адгезии нефтяного битума к армирующим волокнам. Существующие технологии дисперсного армирования химическими волокнами предусматривают в основном применение кондиционных химических волокон, что значительно увеличивает стоимость асфальтобетона. При этом остаются неиспользованными огромные объемы отходов производства, побочных продуктов промышленности, бытовых отходов, содержащих химические волокна. К таким отходам относятся волокнистые сорбенты, отработавшие свой ресурс при локализации и сборе пролившихся нефти, нефтепродуктов, сланцевых и каменноугольных смол, нефтяных и сланцевых фусов, других отходов и побочных продуктов, содержащих жидкие органические вещества.

Введение в асфальтобетонную смесь дисперсной арматуры из волокнистых сорбентов – сборников нефти и нефтепродуктов – является технологическим приемом, который позволяет реализовать преимущества дисперсного армирования и устранить недостатки, касающиеся обеспечения активности ее поверхности, улучшения адгезии и свойств плёнок битума в адсорбционном слое. Эти преимущества появляются вследствие того, что отрезки волокон сорбентов, выполняющие функции дисперсной арматуры, в результате длительного контакта с собранным органическим веществом имеют поверхность, которая уже обработана поверхностно-активными веществами (поверхность лиофилизована), и ей свойственна хорошая адгезия к нефтяному битуму. Кроме того, содержащееся в сорбентах некоторое регулируемое количество поглощенного органического вяжущего воздействует на поверхность минеральных материалов как модифицирующая добавка, улучшающая адгезию

к нефтяному битуму и исключающая избирательную фильтрацию (диффузию) компонентов нефтяного битума в поры и капилляры минеральных материалов. В результате повышаются сдвигоустойчивость асфальтобетона при положительных температурах и эластичность пленок битума при отрицательных температурах. Это снижает вероятность возникновения сдвиговых деформаций в летний период, интенсивность трещинообразования в зимний период, замедляет старение асфальтового вяжущего и приводит к увеличению срока службы асфальтобетонных покрытий.

Технология производства асфальтобетонных смесей предусматривает процессы приготовления дисперсной арматуры из полимерных волокнистых сорбентов (разволокнение и резку), подачу в смесительный агрегат отдозированных минеральных материалов и их перемешивание, подачу дисперсной арматуры из сорбентов и ее перемешивание с минеральными материалами, подачу органического вяжущего (нефтяного битума) и окончательное перемешивание. При реализации этой технологии происходит последовательная обработка минеральных материалов двумя типами вяжущих: на первой стадии (при введении волокнистых сорбентов с содержащимся в них углеводородным сырьем) вяжущим, имеющим высокую адгезию к поверхности минеральных материалов; на второй стадии – нефтяным битумом, обеспечивающим хорошую когезию и водостойкость.

Общеизвестно, что нефть, сланцевая, каменноугольная смолы содержат большое количество высокоактивных компонентов (карбоновые кислоты, фенолы, кетоны). В процессе приготовления асфальтобетонной смеси, при введении в минеральный материал дисперсной арматуры из волокнистых сорбентов, насыщенных собранными нефтепродуктами (первая стадия введения органического вяжущего), эти компоненты, вступая в химическое взаимодействие с поверхностью минерального материала, модифицируют ее, обеспечивают наличие хемосорбционных связей с образованием водонерастворимых соединений на поверхности минерального материала. Кроме того, в процессе избирательной фильтрации активные компоненты нефтепродуктов проникают по порам и капиллярам внутрь минерального материала, взаимодействуя с поверхностью пор и капилляров. В результате этих процессов происходит кольматация пор и капилляров минерального материала компонентами вяжущего, используемого на первой стадии.

При обработке полученной органоминеральной смеси нефтяным битумом реализуется вторая стадия введения органического вяжущего. При этом адгезия нефтяного битума к модифицированной поверхности, лиофилизованной на первой стадии введения вяжущего, будет существенно выше, нежели адгезия битума к поверхности необработанных (немодифицированных) минеральных материалов. Процесс избирательной фильтрации компонентов нефтяного битума в поры и капилляры минерального материала не будет иметь места, т. к. эти поры и капилляры уже заполнены компонентами органического вяжущего на первой стадии. Следовательно, адсорбционные слои нефтяного битума на поверхности минеральных материалов не будут обедняться низкомолекулярными фракциями, что положительно скажется на их

эластичности при отрицательных температурах. За счет этого повысится трещиностойкость асфальтобетонных смесей и их долговечность.

Предложенная технологическая последовательность обработки минеральных материалов позволяет получить на их поверхности наложение (суперпозицию) двух слоев структурированных органических вяжущих. При этом слой нефтяного битума, обладая более высокой водостойкостью, будет предохранять адсорбционный слой нефтепродуктов от воздействия влаги, а слой нефтепродуктов обеспечит высокую адгезию и существенное снижение избирательной фильтрации низкомолекулярных компонентов нефтяного битума.

В данной работе рассмотрен лишь один аспект дисперсного армирования асфальтобетонных смесей волокнистыми сорбентами – влияние содержащихся в сорбентах нефтепродуктов на адгезию нефтяного битума к поверхности волокон дисперсной арматуры и к поверхности минеральных материалов. Исследования величины адгезии к минеральным материалам проводили стандартным методом (методом кипячения) и методом определения величины краевого угла смачивания органическим вяжущим поверхностей минеральных материалов. Исследование величины адгезии органических вяжущих к волокнам дисперсной арматуры проводили только путем определения величины краевого угла смачивания органическим вяжущим поверхности волокнообразующих полимеров, из которых изготавливаются волокнистые сорбенты. При определении величины краевого угла смачивания материал с нанесенной на него каплей битума помещался на площадку проекционного аппарата так, чтобы лучи света были параллельны поверхности, на которую нанесена капля. Полученное изображение проецировалось на экран, где на четырех образцах с достаточной точностью определялся краевой угол смачивания. На приведенных рисунках представлены принципиальные схемы определения величин краевого угла смачивания. Адгезия к минеральным материалам исследовалась на кислых породах (гранит) и основных породах (диабаз). В качестве целевых продуктов, поглощенных волокнистыми сорбентами, были приняты сырая нефть Первомайского месторождения Томской области и топочный мазут. Волокнообразующие полимеры представлены изотактическим полипропиленом, наиболее часто используемым для производства волокнистых сорбентов, и полиамидом.

Исследования адгезии к минеральным материалам производили при введении нефтепродуктов в битум и в минеральный материал. Введение нефтепродуктов в минеральный материал моделировало технологию приготовления асфальтобетонных смесей, предусматривающую подачу в мешалку дисперсной арматуры до поступления битума. Введение нефтепродуктов в битум моделировало технологию приготовления асфальтобетонных смесей, предусматривающую введение в мешалку дисперсной арматуры после подачи битума. При введении нефтепродуктов в битум их количество составляло 5–10 % от массы битума. В минеральный материал нефтепродукты вводились в количестве 0,5–1,5 % от массы минерального материала.

На рис. 1 представлены данные, отражающие зависимость адгезии органического вяжущего к минеральному материалу от количества нефти, со-

держащейся в сорбентах, при введении дисперсной арматуры в смесь минерального материала с битумом.

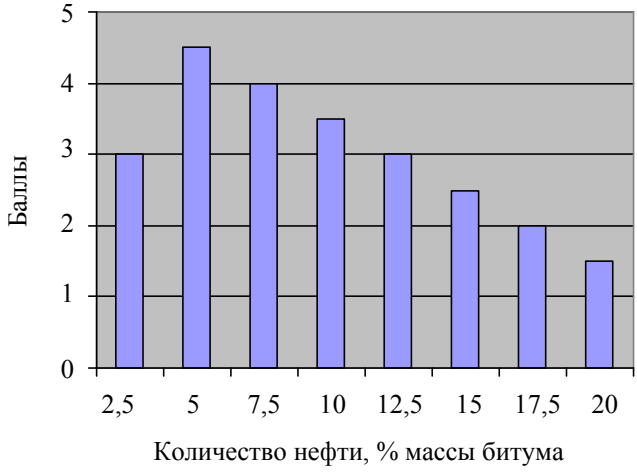


Рис. 1. Зависимость показателя сцепления битума с поверхностью гранита от количества нефти, введенной в битум

На рис. 2 представлены данные, отражающие изменение величины адгезии органического вяжущего к минеральному материалу при введении дисперсной арматуры в минеральный материал до обработки его битумом.

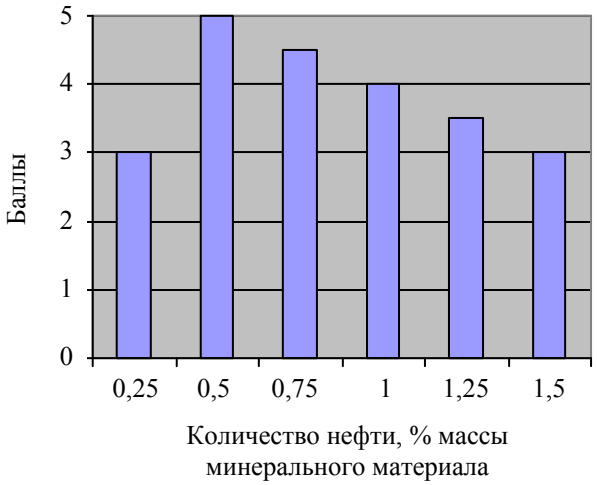


Рис. 2. Зависимость сцепления битума с поверхностью гранита от количества нефти, введенной в минеральный материал

Из рисунков видно, что в обоих случаях улучшается сцепление вяжущего с минеральным материалом. Однако при введении волокнистых сорбентов в минеральный материал до обработки его битумом достигаемый эффект значительно выше. Как известно, нефть из-за своей повышенной химической активности обладает более выраженной адгезионной способностью, чем нефтяной битум. При непосредственном введении в минеральный материал это свойство реализуется более полно. Введение дисперсной арматуры, содержащей нефтепродукты, на первой стадии приводит к тому, что на второй стадии нефтяным битумом обрабатывается нефтеминеральная смесь, в которой уже достигнута высокая адгезия вяжущего к поверхности минерального материала за счет наличия в нефти высокоактивных фенолов и карбоновых кислот.

Проведены также исследования адгезии органических вяжущих к поверхности минеральных материалов по значению величины краевого угла смачивания. На рис. 3–5 представлены результаты исследования величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхностей минеральных материалов основных и кислых изверженных горных пород (гранита и диабаза), модифицированных сырой нефтью и мазутом.

На рис. 3 представлена расчетная схема определения величины краевого угла смачивания не модифицированной нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхности гранита и диабаза. По результатам четырех испытаний установлено, что величина краевого угла смачивания составляет 90–110°.

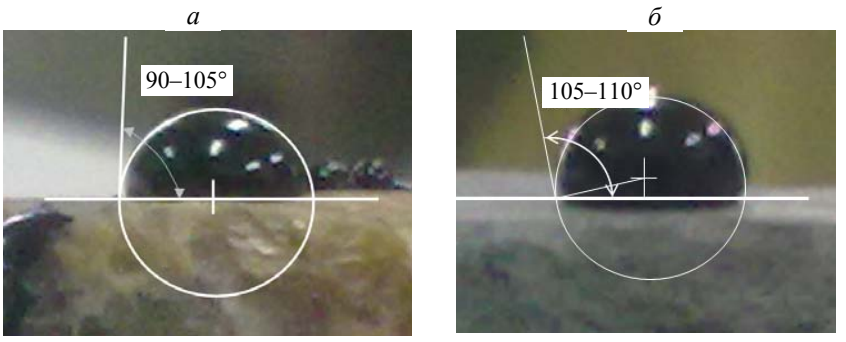


Рис. 3. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания гранита нефтяным битумом марки БНД 90/130 немодифицированой поверхности минеральных материалов:
а – гранит; *б* – диабаз

При модифицировании поверхности гранита краевой угол смачивания битумом снижается. Из расчетной схемы, представленной на рис. 4, видно, что нефть обеспечивает снижение этой величины до 30–35°, что в три раза меньше величины краевого угла смачивания нефтяным битумом немодифицированной поверхности гранита. Это свидетельствует о том, что и величина адгезии нефтяного битума к модифицированной поверхности минерального материала также будет выше. При модифицировании поверхности гранита мазутом величина краевого угла смачивания её битумом составляет 18–22°, что отражает существенное улучшение адгезии битума.

На рис. 5 представлено исследование величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхностей диабаза, модифицированных нефтью и мазутом. По сравнению с немодифицированными поверхностями, эта величина существенно ниже, что свидетельствует об улучшении адгезии битума при введении дисперсной арматуры из волокнистых сорбентов, содержащих нефтепродукты.

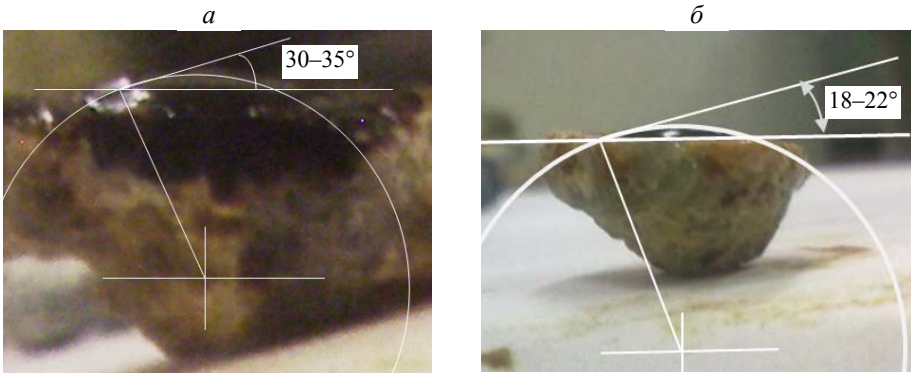


Рис. 4. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхности минеральных материалов:
а – гранит, модифицированный нефтью; *б* – гранит, модифицированный мазутом

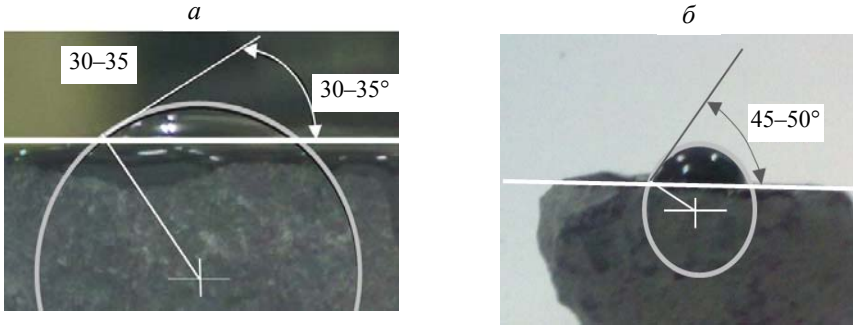


Рис. 5. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхности минеральных материалов:
а – диабаз, модифицированный нефтью; *б* – диабаз, модифицированный мазутом

На рис. 6–8 представлены результаты исследования величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхностей волокнообразующих полимеров, используемых для изготовления сорбентов.

Рис. 6–8 свидетельствуют, что величины краевого угла смачивания нефтяным битумом модифицированных поверхностей во всех случаях ниже (в 2–5 раз) значений величин краевого угла смачивания нефтяным битумом немодифицированных поверхностей волокнообразующих полимеров, что доказывает увеличение адгезии битума к волокнам отработанных сорбентов, используемым в дорожном строительстве для производства дисперсной арматуры.

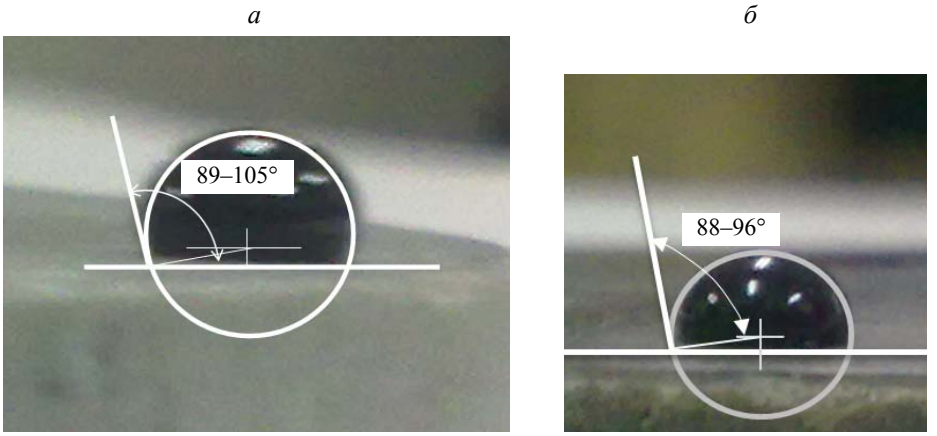


Рис. 6. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 немодифицированной поверхности волокнообразующих полимеров:
а – изотактический полипропилен; *б* – полиамид

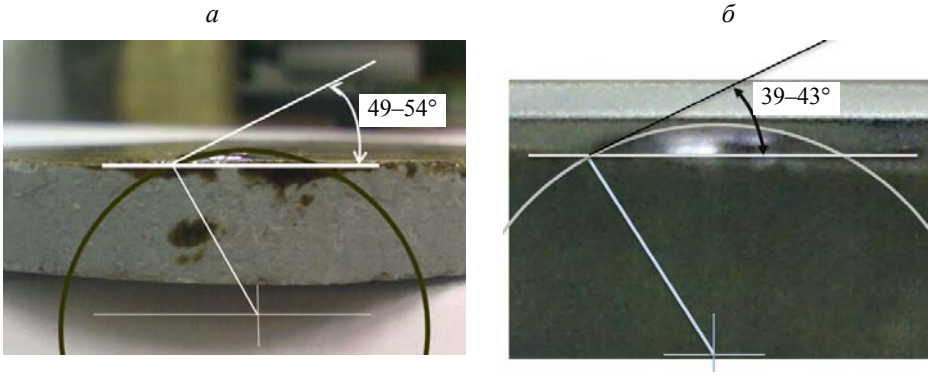


Рис. 7. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхности волокнообразующего полимера:
а – изотактический полипропилен, модифицированный нефтью; *б* – изотактический полипропилен, модифицированный мазутом

Проведенные исследования показали, что модифицирование поверхностей дисперсной арматуры и минеральных материалов при использовании отработанных волокнистых сорбентов в составе асфальтобетонных смесей существенно улучшает их смачивание нефтяным битумом. Краевой угол смачивания битумом необработанных поверхностей составляет 88–112°. При переходе к модифицированным поверхностям краевой угол смачивания снижается до 18–50°. При исследовании адгезии методом кипячения установлено, что и активация битума, и модифицирование поверхности минеральных материалов нефтью улучшают сцепление вяжущего с минеральным материалом. Однако при введении нефти в минеральный материал достигаемый эффект значительно выше, чем при введении в битум.

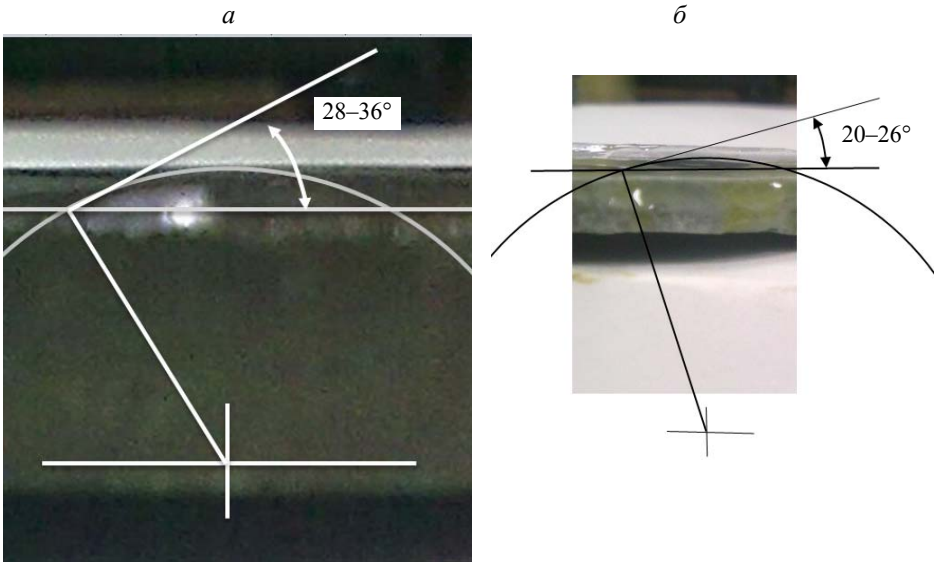


Рис. 8. Расчетная схема определения величины краевого угла смачивания нефтяным битумом марки БНД 90/130 поверхности волокнообразующего полимера:
а – полиамид, модифицированный нефтью; *б* – полиамид, модифицированный мазутом

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что при дисперсном армировании асфальтобетонных смесей волокнистыми сорбентами, насыщенными собранными нефтепродуктами, для увеличения адгезии нефтяного битума к поверхности минеральных материалов необходимо в минеральный материал, нагретый до температуры, предусмотренной стандартом, вводить расчетное количество дисперсной арматуры и производить перемешивание. Далее в смесь минеральных материалов и дисперсной арматуры вводить нефтяной битум, нагретый до требуемой температуры, после чего осуществляется окончательное перемешивание. Количество нефтепродуктов, содержащихся в волокнистых сорбентах, используемых в качестве дисперсной арматуры, определяется для каждого конкретного случая в зависимости от зернового состава асфальтобетонной смеси, вязкости и количества вводимого битума.

Библиографический список

1. *Von Dipl, E. Enstaccino.* Glassfasern in Dichtungasphalt //Osterreichische Wasserwirtschaft. Jahrgang 27. – 1975. – P. 53–88.
2. *Крылов, Б.А.* Фибробетон и фиброцемент за рубежом / Б.А. Крылов // Сер. Строит. материалы, изделия и конструкции: обзорн. информ. / ЦНИИС; Вып. 5. – М., 1979. – 53 с.
3. *Grzybowska, W.* Badame nad poprova wlastnosci nawerzchniavych betonow asphaltowych dodatkiem adpadowych wlokien polistrowych / W. Grzybowska // Wybrane pr.zakr.inz.ladow. Polytechn. – Krakov, 1982. – P. 287–303.
4. *Акулич, А.В.* Структура и свойства дисперсно-армированных асфальтобетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск,1987. – 17 с.

5. *Гамеляк, И.П.* Разработка методики конструирования дорожных одежд со слоями из дисперсно армированных асфальтобетонов : автореферат дис. … канд. техн. наук. – М. : Госдорнии, 1992. – 23 с.
6. *Мерзликин, А.Е.* Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно армированного асфальтобетона / А.Е. Мерзликин, И.П. Гамеляк // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд. – Тр. Союздорнии, 1990. – С. 17–25.
7. *Соломатов, В.И.* Структура и свойства дисперсно армированного асфальтобетона / В.И. Соломатов, А.В. Акулич // Повышение качества стр-ва автомоб. дорог в Нечерноземной зоне РСФСР : тез. докл НТК. – Владимир, 1987. – С. 152.

REFERENCES

1. *Von Dipl, E. Enstaccino.* Glassfasern in Dichtungasphalt. Osterreichische Wasserwirtschaft. Jahrgang 27. 1975. Pp. 53–88.
2. *Krylov B.A.* Fibrobeton i fibrotsement za rubezhom [Fibre reinforced concrete and cement abroad]. Ser. Stroit. materialy, izdeliya i konstruktsii [Construction materials, products, and structures], TsNIIS Publ., Moscow : 1979. No. 5. 53 p. (rus)
3. *Grzybowska W.* Badame nad poprova wlastnosci nawerzchniavych betonow asphaltowych dodatkiem adpadowych wlokien polistrowych. Wybrane pr.zakr.inz.ladow. Polytechn. Krakov, 1982. Pp. 287–303.
4. *Akulich A.V.* Struktura i svoistva dispersno armirovannikh asfaltobetonov [Structure and properties of particulate-reinforced asphalt, PhD thesis]. Minsk, 1987. 17 p. (rus)
5. *Gameliak I.P.* Razrabotka metodiki konstruirovaniia dorognikh odejd so sloiami iz dispersno armirovannikh asfaltobetonov [Design technique for fiber reinforced pavements, PhD thesis]. Moscow : Rosdornii [Russian Road Research Institute], 1992. 23 p. (rus)
6. *Merzlikin A.E., Gamelyak I.P.* Ispytaniya konstruktsii dorozhnykh odezhd dlya otsenki effektivnosti primeneniya dispersno armirovannogo asfal'tobetona [Fiber reinforced pavement efficiency tests]. Konstruirovanie, raschet i ispytanie dorozhnykh odezhd [Pavement design, calculation and test]. Soyuzdornii, Tr., 1990. Pp. 17–25. (rus)
7. *Solomatov V.I., Akulich A.V.* Struktura i svoistva dispersno armirovannogo asfaltobetona [Structure and properties of fiber-reinforced asphalt]. Improving the quality of automobile roads in nonchernozem belt of the RSFSR]. *Proc. Sci. Conf.* Vladimir, 1987. P. 152. (rus)

УДК 621.928.37

МАТВИЕНКО ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
matvolegv@mail.ru
БАЗУЕВ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ, ст. научный сотрудник,
slab@mail.tomsknet.ru
ВЕНИК ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, зав. лабораторией,
slab@mail.tomsknet.ru
СМИРНОВА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА, инженер,
slab@mail.tomsknet.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ В СМЕСИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ

В работе исследован процесс образования кавитационных пузырьков в кавитационно-смесительном диспергаторе. Установлено, что формирование зоны кавитации осуществляется в области пережима канала, где происходит значительное увеличение скорости потока и, соответственно, уменьшение давления. Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемых режимных условий оптимальное пересжатие, обеспечивающее устойчивое существование зоны кавитации, лежит в диапазоне $0{,}5 < r_{\min}/R < 0{,}65$. С повышением температуры происходит увеличение размеров кавитационной зоны. При температуре жидкости, близкой к температуре кипения (T = 365 К), кавитационная зона локализуется не только в области пересжатия канала, но и распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть кавитационно-смесительного диспергатора.

Ключевые слова: кавитация; турбулентность; вязкая жидкость; гидродинамика.

OLEG V. MATVIENKO, DSc, Professor,
matvolegv@mail.ru
VICTOR P. BAZUEV, Senior Research Assistant,
slab@mail.tomsknet.ru
VLADIMIR N. VENIK, Head of laboratory,
slab@mail.tomsknet.ru
NATALYA G. SMIRNOVA, Engineer,
slab@mail.tomsknet.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF CAVITATION IN CAVITATION DISPERSER

The paper presents investigation of cavitation process in a cavitation disperser. It is shown that cavitation zone is formed in the channel pinch area where the significant increase of flow rate and decrease of pressure are observed. Calculations showed that for the given operation modes the optimal pinch value ranges between $0{,}5 < r_{\min}/R < 0{,}65$. The size of cavitation zone in-

creases with the temperature increase,. At a liquid temperature close to the boiling point (T= 365 K), the cavitation zone is localized not only in the pinch area but also extends downstream and occupies a greater part of the cavitation disperser.

Keywords: cavitation; turbulence; viscous fluid; hydrodynamics.

В настоящее время широкое распространение получили холодные технологии производства битуминозных строительных материалов (асфальтобетонные смеси, кровельные, гидроизоляционные и другие материалы).

Особо перспективно применение водно-битумных эмульсий при производстве строительных и ремонтных работ дорожных покрытий. Использование водно-битумных эмульсий в отличие от горячего битума, обеспечивает значительную экономию битума (до 15 %) и снижение энергетических затрат в 1,5 раза.

Применение эмульсий обеспечивает высокую степень сцепления между существующим нижним и новым слоями покрытия, повышенную износоустойчивость покрытия, возможность производства работ с ранней весны до поздней осени (температура окружающей среды не менее 5 °С), возможность нанесения покрытий на влажную поверхность.

Битумные эмульсии представляют собой смесь дисперсного битума и воды с добавлением специальных эмульгирующих добавок, стабилизирующих дисперсную систему. Они экологически чисты, удобны при транспортировке и хранении.

Получение водно-битумных эмульсий всегда связано с процессом дробления дисперсной фазы. Учитывая, что вода и битум не смешиваются в обычных условиях, такой процесс всегда связан с определенными трудностями.

Для приготовления битумных эмульсий используются технологические устройства, различающиеся между собой принципом действия, конструкционными и технологическими параметрами.

Существующие в настоящее время установки для приготовления эмульсий, как отечественного, так и зарубежного производства, отличаются сложностью изготовления, эксплуатации и высокой стоимостью. Поэтому становится актуальной задача разработки эффективного и экономически выгодного способа изготовления битумных эмульсий без ухудшения их свойств [1].

С этой целью был разработан кавитационный смеситель-диспергатор (КСД) [2, 3] (рис. 1), состоящий из входного патрубка ввода водной фазы *1*, выполненного в виде полого усеченного конуса и соединенного с завихрителем *2*, патрубка ввода диспергируемого компонента *3* с обратным клапаном *4* и выходного патрубка *5*, внутри которого установлен суперкавитатор *6*. При этом ось выходного патрубка совпадает с осью патрубка подачи диспергируемого компонента и перпендикулярна оси входного патрубка.

Устройство работает следующим образом. Во входной патрубок подается водная фаза под давлением. Проходя через завихритель, струя воды разгоняется и закручивается, при этом линейные скорости достигают 40 м/с. Одновременно через патрубок *3* подается струя битума. Затем поток поступает на суперкавитатор, в котором происходит дробление и распределение дисперсионной фазы.

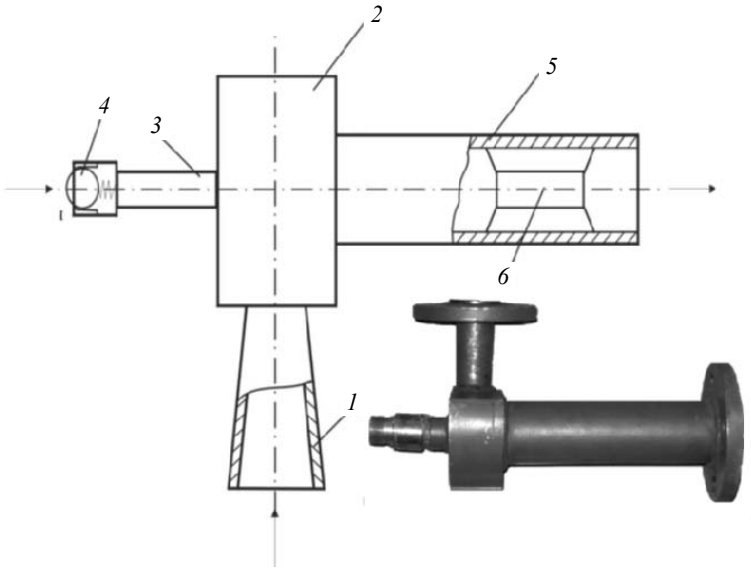


Рис. 1. Внешний вид и схема КСД

Данное устройство показало высокую эффективность и надежность в работе, при этом получаемая с его помощью битумная эмульсия имела высокую степень дисперсности.

Проведенные экспериментальные исследования позволили прийти к выводу о возможности применения принципа кавитационно-смесительного диспергирования для получения битумных эмульсий как на жидких, так и на вязких битумах различной концентрации.

В настоящей работе представлены методика и некоторые результаты расчета процесса кавитации водной фазы в кавитационно-смесительном диспергаторе.

Для описания поля течения в цилиндрическом канале используются двумерные осесимметричные уравнения Рейнольдса, записанные относительно осредненных по времени составляющих скорости: u, v, w и давления p [4, 5]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v r}{\partial x}=0\,, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho u v r}{\partial r}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{eff}\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial v r}{\partial r}\right)\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{eff} r\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right], \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho u v}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v^2 r}{\partial r}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right]+$$
$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{eff} r\left(2\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial v r}{\partial r}\right)\right)\right]-2\frac{\mu_{eff} v}{r^2}+\frac{\rho w^2}{r}\,, \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho u w}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v w r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{eff}\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[\mu_{r\phi} r^3\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)\right]-\frac{\rho v w}{r}\,. \tag{4}$$

В отсутствие турбулентных пульсаций осредненные по Рейнольдсу параметры совпадают с мгновенными, и уравнения Рейнольдса переходят в уравнения Навье – Стокса для описания ламинарного течения.

Исследование характеристик турбулентности осуществлялось с использованием двупараметрической *k*-ε модели, адаптированной Джонсом и Лаундером для расчета течений с низкими числами Рейнольдса [6–8]:

$$\frac{\partial \rho u k}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v k r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}r\frac{\partial k}{\partial r}\right]+G-\rho\varepsilon-D, \qquad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u \varepsilon}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial \rho v \varepsilon r}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial r}\right]+\left(C_1-C_2\rho\varepsilon\right)\frac{\varepsilon}{k}+E, \qquad (6)$$

$$G=\mu_t\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2+\left(\frac{v}{r}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(r\frac{\partial w/r}{\partial r}\right)^2\right\},$$

$$D=2\mu\left[\left(\frac{\partial\sqrt{k}}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\sqrt{k}}{\partial x}\right)^2\right],$$

$$E=2\frac{\mu_0\mu_t}{\rho}\left\{\left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right)+\frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right)\right]^2+\left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)+\frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v}{\partial r}\right)\right)\right]^2+\right.$$

$$\left.+\left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+\frac{1}{r^2}\left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial w}{\partial r}\right)\right)\right]^2\right\}.$$

Описанная выше модель турбулентности может быть модифицирована для расчета закрученных потоков введением соответствующих поправок, зависящих от градиентного и турбулентного чисел Ричардсона:

$$\mathrm{Ri}_g=\frac{2\mu w}{G}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right), \qquad \mathrm{Ri}_t=\frac{k^2}{\varepsilon^2}\frac{w}{r^2}\frac{\partial\left(wr\right)}{\partial r}.$$

Введение поправки на градиентное число Ричардсона [9] основано на анализе устойчивости турбулентных вихрей в поле центробежной силы [10]

$$C_1=1,44\left(1+C_3\mathrm{Ri}_g\right).$$

В зависимости от радиального распределения тангенциальной скорости кинетическая энергия пульсационного движения может переходить в потенциальную энергию вращательного движения (консервативное воздействие) или потенциальная энергия – в кинетическую [10].

При активном характере воздействия градиентное число Ричардсона принимает отрицательные значения, что приводит к уменьшению диссипации турбулентной кинетической энергии и, как следствие этого, к дополнительной турбулизации потока.

В случае положительных значений градиентного числа Ричардсона центробежные силы препятствуют радиальному перемещению жидкости, что приводит к увеличению ε и, соответственно, к уменьшению турбулентной кинетической энергии.

Турбулентное число Ричардсона, описывающее влияние кривизны линий тока на пространственный масштаб турбулентности, вводится в выражение для коэффициента C_2, которое входит в источниковый член уравнения (6) для диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$C_2 = 1{,}92\left(1 - C_4 \mathrm{Ri}_t\right).$$

Тем самым учитывается увеличение диссипации турбулентной кинетической энергии в ядре потока и ее уменьшение в пристеночной области, которое происходит в результате закрутки потока вследствие искривления линий тока.

Эффективная вязкость (μ_{eff}) определяется как сумма молекулярной (μ) и турбулентной вязкости (μ_t)

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t .$$

Турбулентная вязкость может быть рассчитана с использованием k-ε модели турбулентности

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho k^2 \varepsilon^{-1},$$

где $C_\mu = 0{,}09$ – константа модели турбулентности,

$f_\mu = \exp\left(-3{,}4 \Big/ \left(1 + 0{,}02\mathrm{Re}_t\right)^2\right)$, $f_2 = 1 - 0{,}3\exp\left(-\mathrm{Re}_t^2\right)$ – функции модели турбулентности, зависящие от турбулентного числа Рейнольдса $\mathrm{Re}_t = \rho k^2 / \mu\varepsilon$.

Искривление линий тока в закрученных течениях приводит к анизотропии течения. Для учета анизотропных свойств необходимо скорректировать турбулентные напряжения, вызванные закруткой потока. Эта коррекция осуществляется введением «вращательной» вязкости [9]

$$\mu_{r\phi} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{r\phi}}.$$

Значения констант выбираются в соответствии с рекомендациями [8, 10]

$$C_3 = 0{,}9;\ C_4 = 0{,}001;\ C_\mu = 0{,}09;\ \sigma_\varepsilon = 1{,}3;\ \sigma_{r\varphi} = 2{,}5.$$

Вследствие эллиптичности системы дифференциальных уравнений для замыкания задачи необходима постановка граничных условий на всех границах расчетной области (рис. 2).

Граничные условия на входе в КСД из патрубка ввода диспергируемого компонента ($x = 0$, $0 \le r \le R_1$) определяются как

$$u = u_{in} = Q_\Pi \big/ \pi \rho_b R_1^2, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad k = k_{in} = \mathrm{Tu} \cdot u_{in}^2, \quad \varepsilon = k_{in}^{3/2} \big/ \eta R_1 .$$

Граничные условия на выходе из завихрителя ($0 \le x \le L_1$, $r = R_4$) определяются как

$$u = 0\,, \quad v = \frac{Q_I}{4\pi R_4 L_1 \rho_1}\,, \quad w = \frac{Q_I}{S_{in}\rho_1}\,, \quad k = \mathrm{Tu}\left(\frac{Q_{in}}{S_{in}\rho_1}\right)^2, \quad \varepsilon = \frac{\mathrm{Tu}^{3/2}}{\eta R_4}\left(\frac{Q_1}{S_{in}\rho_1}\right)^3.$$

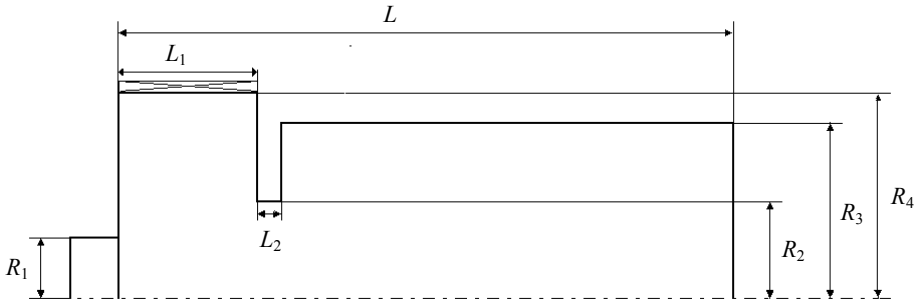


Рис. 2. Границы расчетной области

На оси течения ($0 \le x \le L$, $r = 0$) записываются следующие условия симметрии:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0\,, \quad v = 0\,, \quad w = 0\,, \quad \frac{\partial k}{\partial r} = 0\,, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0\,.$$

В выходном сечении ($x = L$, $0 \le r \le R_3$) осевые составляющие градиента тангенциальной скорости, а также турбулентных характеристик k и ε предполагаются равными нулю. Таким образом, в выходном сечении граничные условия можно записать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0\,, \quad v = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0\,, \quad \frac{\partial k}{\partial x} = 0\,, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0\,.$$

На стенках моделируются условия прилипания и непротекания. Для определения турбулентных характеристик предполагается локальное равновесие в пристеночной области

$$u = 0\,, \quad v = 0, \quad w = 0\,, \quad k = 0\,, \quad \varepsilon = 0\,.$$

На основе представленной выше математической модели было проведено численное исследование структуры течения в КСД. Расчетные параметры аппарата имели следующие значения: $R_1 = 7$, $R_2 = 12$, $R_3 = 17$, $R_4 = 20$, $L_1 = 120$, $L_2 = 20$, $L = 500$ мм, $S_{in} = 240$ мм^2.

Рассмотрим сначала особенности структуры течения и характеристик турбулентности в отсутствие центральной струи. На рис. 3, 4 показаны соответственно поля тангенциальной и осевой составляющих скорости.

Радиальное распределение тангенциальной составляющей скорости в приосевой области носит квазитвердый характер, а в пристеночной – квазипотенциальный. Между этими областями реализуется промежуточный режим течения. Максимальные значения тангенциальной скорости наблюдаются в области, непосредственно примыкающей к завихрителю. Вниз по течению интенсивность вращательного движения в результате действия вязких сил существенно уменьшается.

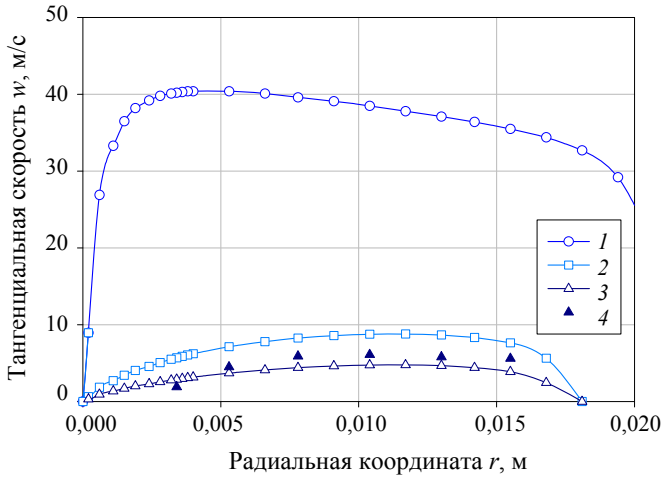


Рис. 3. Радиальное распределение тангенциальной скорости:
1 – расчет (x = 50 мм); *2* – расчет (x = 150 мм); *3* – расчет (x = 450 мм); *4* – эксперимент (x = 450 мм)

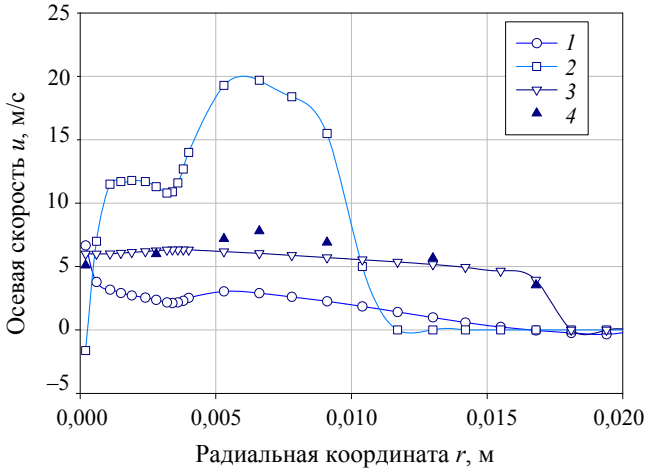


Рис. 4. Радиальное распределение осевой скорости:
1 – расчет (x = 50 мм); *2* – расчет (x = 150 мм); *3* – расчет (x = 450 мм); *4* – эксперимент (x = 450 мм)

Закрутка потока приводит к появлению тангенциальной составляющей скорости w и формированию поля центробежных сил, пропорциональных $\rho w^2/r$, которые интенсифицируют движение жидкости в радиальном направлении. При малой интенсивности закрутки ($\varphi < 50°$) градиент давления, вызванный наличием центробежных сил, приводит лишь к уменьшению значений u в приосевой области [11–14]. При большей закрутке в окрестности оси течения возникает большее разрежение, которое приводит к образованию

центральной зоны возвратных течений. Чем больше интенсивность закрутки потока, тем больше становится рециркуляционная зона и тем большее количество жидкости рециркулирует к торцевой поверхности камеры. Вблизи торца, а также по мере удаления от завихрителя особенности течения, вызванные закруткой потока, становятся менее выраженными. Профиль осевой скорости становится монотонным с максимумом на оси течения.

Распределение избыточного давления на выходе из улиточного завихрителя показано на рис. 5. Максимальные значения давления реализуются на периферии потока, что связано с действием поля центробежных сил. В приосевой области давление близко к атмосферному, при этом в области сужения канала заметна зона отрицательных давлений. При этом, чем больше интенсивность закрутки, тем шире область отрицательных давлений.

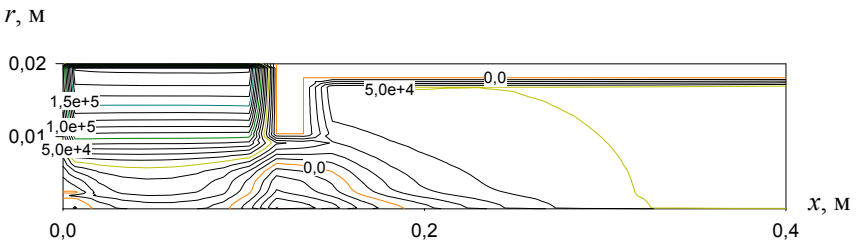


Рис. 5. Распределение давления

На рис. 6 приведены изолинии турбулентной кинетической энергии. Из рисунка видно, что наибольшие значения турбулентной кинетической энергии локализуются в области, где происходит разворот потока и градиенты скоростей очень велики: в окрестности торцевой стенки, а также в области сужения потока. Затем турбулентность вследствие конвекции переносится вниз по потоку, постепенно угасая.

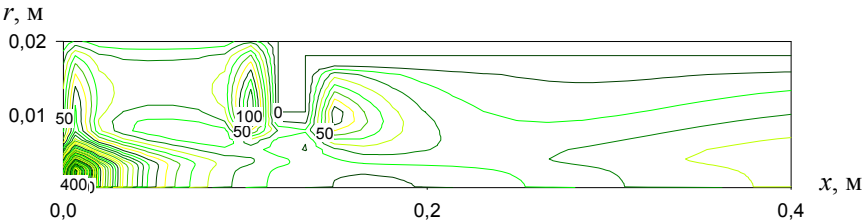


Рис. 6. Распределение турбулентной кинетической энергии

Введение в поток центральной струи жидкости существенно изменяет структуру течения.

Подача центральной струи происходит без ее закрутки, в то же время подвод потока жидкости через улиточный завихритель осуществляется без осевой составляющей скорости. Таким образом, структура течения определяется взаимодействием этих потоков.

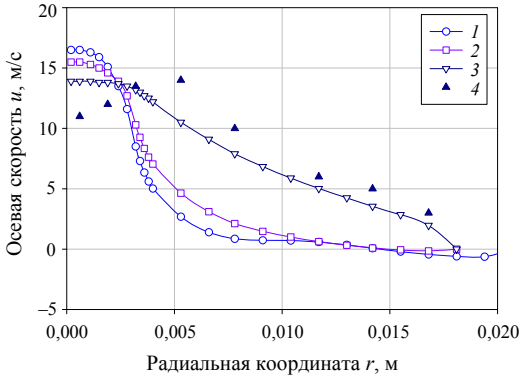


Рис. 7. Радиальное распределение осевой скорости:
1 – расчет (x = 50 мм); *2* – расчет (x = 150 мм); *3* – расчет (x = 450 мм); *4* – эксперимент (x = 450 мм)

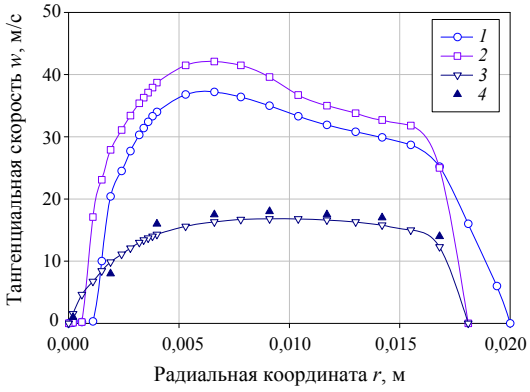


Рис. 8. Радиальное распределение тангенциальной скорости:
1 – расчет (x = 50 мм); *2* – расчет (x = 150 мм); *3* – расчет (x = 450 мм); *4* – эксперимент (x = 450 мм)

Как видно из рис. 7, для осевой составляющей скорости характерно наличие ядра, в котором осевая скорость u остается практически постоянной и равной скорости истечения, и пограничного слоя, в котором происходит падение скорости до скорости спутного потока. При этом профиль осевой составляющей скорости имеет вид кривой Гаусса

$$u(r) = U + (u_* - U)\exp\left[-\alpha\left(\frac{r}{r_*}\right)^2\right],$$

где U – скорость спутного потока; u_* – скорость на оси потока; r_* – радиальная координата точки, где выполняется условие $\left(u(r) - U\right) = 0{,}5\left(u_* - U\right)$; α – константа, зависящая от режима течения и геометрии потока.

По мере удаления от входа в результате обмена осевой составляющей импульса происходит увеличение осевой скорости слоев I жидкости, примыкающих к поверхности струи II жидкости. При этом гауссовский характер распределения осевой скорости сохраняется. Значения r_* монотонно увеличиваются вниз по потоку, что свидетельствует о формировании и распространении эффективной струи, центральная часть которой представляет поток II жидкости, а периферийная – поток I жидкости. При этом смешения этих потоков не происходит.

В результате обмена импульсом в тангенциальном направлении происходит вовлечение центрального потока II жидкости во вращательное движение. При этом, если на начальном участке течения центральная струя сохраняет незакрученность, то уже на расстоянии, равном примерно одному диаметру струи, весь поток вращается как единое целое (рис. 8).

Распределение давления в потоке с центральной струей представлено на рис. 9. Качественно оно имеет тот же вид, что и на рис. 5: максимальное давление в пристеночной области, минимальное – в приосевой. Зона разрежения в соответствии с законом Бернулли локализуется в области сужения канала. При этом необходимо отметить, что при вводе центральной струи давление в канале возрастает примерно в 40 раз.

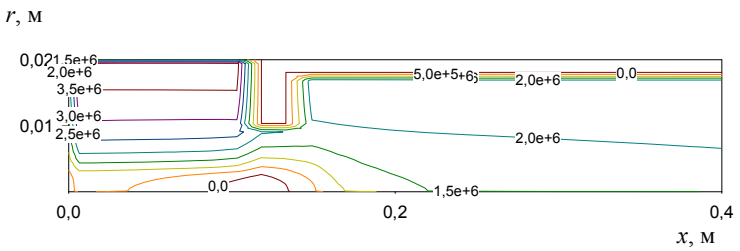


Рис. 9. Распределение давления

Анализ изолиний турбулентной кинетической энергии в потоке с центральной струей (рис. 10) указывает на то, что в дополнение к традиционным зонам генерации турбулентности, связанным с областями разворота потока, возникает зона генерации турбулентности в окрестности границы центральной струи и внешнего закрученного потока. И эта зона играет важную роль в процессе распада струи и формирования дисперсной системы.

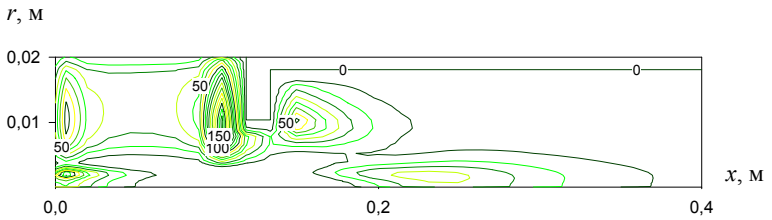


Рис. 10. Распределение турбулентной кинетической энергии

При моделировании процесса кавитации исходили из следующих предположений [15]. Известно, что в чистых однородных жидкостях кавитации практически не наблюдается, т. к. однородные жидкости обладают достаточно высокой прочностью на разрыв. Однако присутствие газов в жидкости уменьшает ее прочностные характеристики.

Таким образом, газы могут находиться в воде в виде пузырьков и микропузырьков или в растворенном на молекулярном уровне состоянии. Соотношение между концентрацией газа в жидкости и парциальным давлением газа у поверхности в равновесном состоянии описывает закон Генри. Концентрация газа, растворенного при постоянной температуре в данном растворителе до насыщения, прямо пропорциональна парциальному давлению этого газа над поверхностью раствора: $M_0 = \Gamma p_0$.

При снижении парциального давления (увеличении температуры) вода становится перенасыщенной, и газ выходит из жидкости в виде пузырьков. Микропузырьки практически незаметны для глаза по отдельности и кажутся молочной смесью в массе. При увеличении давления (снижении температуры) газ дополнительно растворяется в жидкости, микропузырьки не образуются.

При моделировании движения кавитационных пузырьков предполагалось, что скоростью их движения относительно несущей жидкости можно пренебречь вследствие малости размеров этих пузырьков. Таким образом, уравнение переноса газовой фазы имеет вид уравнения диффузии

$$\frac{\partial \rho u M_i}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial \rho v M_i}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho D_{\text{p}} \frac{\partial M_i}{\partial x}\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\rho D_{\text{p}} r \frac{\partial M_i}{\partial r}\right]. \qquad (7)$$

Начальный радиус кавитационного пузырька определялся в предположении равновесия сил давления и поверхностного натяжения, действующих на микропузырек:

$$R_0 = \frac{2\sigma}{p_d - p_0},$$

где R_0 – радиус пузырька при давлении; p_d – давление в жидкости на входе в аппарат; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Процесс кавитации, роста и схлопывания пузырьков описывался уравнениями Релея – Плессета:

$$\frac{\partial \rho u U}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial \rho v U}{\partial r} = \frac{p_V - p}{R\rho_l} + \frac{\Gamma M_0}{R\rho_l}\left(\frac{R_0}{R}\right)^{3\gamma} - \frac{3}{2}\frac{U^2}{R} - 4\frac{\mu}{\rho_l}\frac{U}{R^2} - 2\frac{\sigma}{\rho_l R^2}, \qquad (8)$$

$$\frac{\partial \rho u R}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial \rho v R}{\partial r} = U, \qquad (9)$$

где R – радиус пузырька; p_V – давление насыщенного пара; p – давление в жидкости; ρ_l – плотность жидкости; U – скорость изменения радиуса пузырька; γ – постоянная адиабаты.

На рис. 11 приведены результаты расчета кавитации в КСД для различных значений режимных и геометрических параметров.

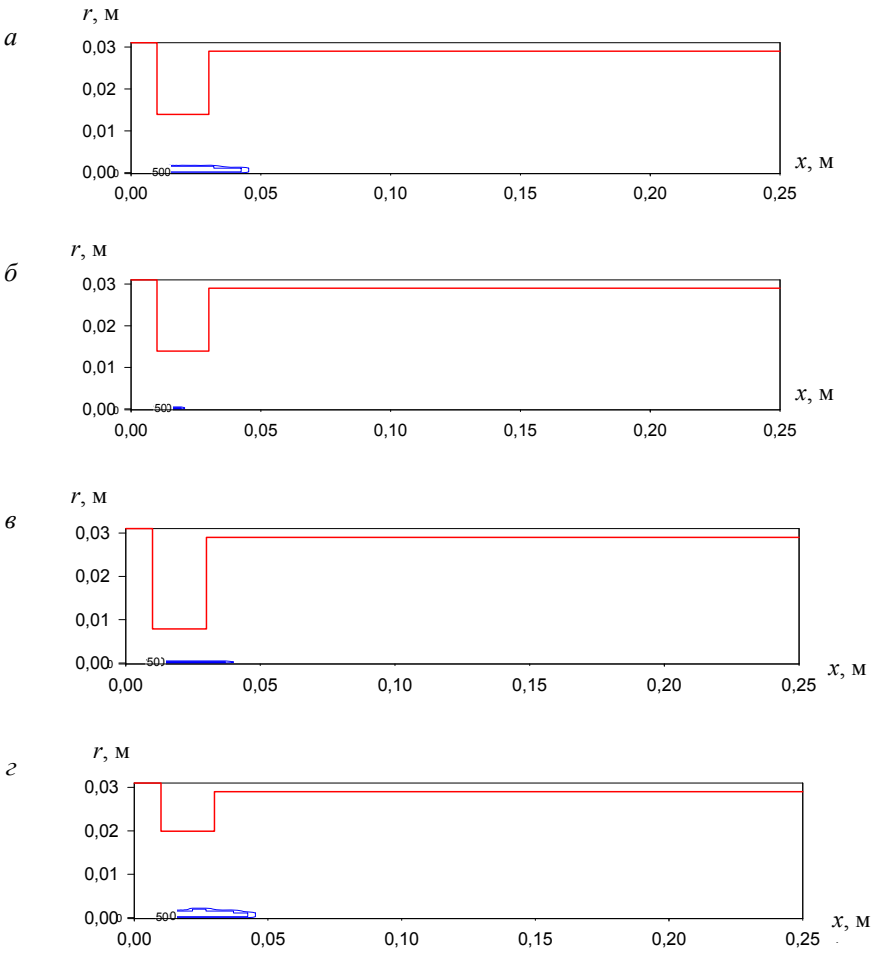


Рис. 11. Кавитация в КСД:
а – p_d = 3 атм; r_{min}/R = 0,5; *б* – p_d = 2 атм; r_{min}/R = 0,5; *в* – p_d = 2 атм; r_{min}/R = 0,25; *г* – p_d = 2 атм; r_{min}/R = 0,65

Под зоной кавитации понималась область течения, в которой объемная концентрация газовой фазы превышала 40 %. Как видно из рисунка, формирование зоны кавитации осуществляется в области пережима канала, где происходит значительное увеличение скорости потока и, соответственно, уменьшение давления. При этом кавитационные пузырьки достигают размера 1 мм. Увеличение давления в аппарате препятствует развитию кавитации: кавитационная зона, а также размер пузырьков становятся существенно меньше. Пережатие канала неоднозначным образом влияет на развитие процесса кавитации. С одной стороны, уменьшение площади поперечного сечения приводит

к ускорению потока и, в соответствии с теоремой Бернулли, уменьшению давления. С другой стороны, сужение потока препятствует его расширению в результате действия центробежных сил. Вследствие этого влияние закрутки на уменьшение давления в приосевой области становится существенно меньше, что приводит к ослаблению кавитации. Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемых режимных условий оптимальное пересжатие, обеспечивающее устойчивое существование зоны кавитации, лежит в диапазоне $0,5 < r_{\min} / R < 0,65$.

Для верификации используемой выше систематической модели было проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных (рис. 12).

Проведенные расчеты показали, что температура жидкости является одним из основных факторов, влияющих на формирование кавитационой зоны (рис. 12). При этом положение кавитационной зоны в выходном патрубке хорошо коррелируется с лабораторными исследованиями.

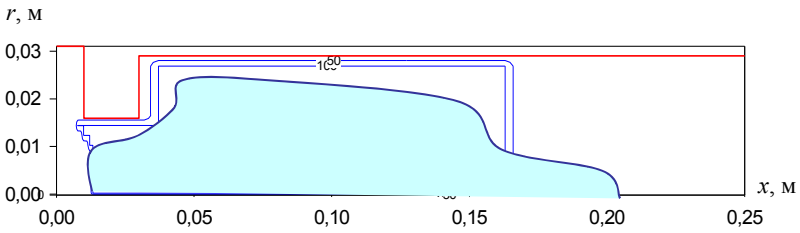


Рис. 12. Кавитация в КСД: p_d = 2 атм; $r_{\min}/R$ = 0,65

Так, при температуре жидкости, близкой к температуре кипения (T = 365 К), кавитационная зона локализуется не только в области пересжатия канала, но и распространяется вниз по потоку, занимая достаточно большую часть КСД. Это способствует формированию битумной эмульсии с улучшенными свойствами.

Библиографический список

1. *Исследование* процесса модификации битума в инжекторном смесителе / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.Г. Туркасова, А.И. Байгулова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 3. – С. 202–213.
2. *Численное* моделирование распада турбулентной струи в спутном закрученном потоке / О.В. Матвиенко, А.К. Эфа, В.П. Базуев, Е.В. Евтюшкин // Известия вузов. Физика. Т. 49. – 2006. – № 6. – С. 96–107.
3. *Базуев, В.П.* Моделирование процесса модифицирования битума в кавитационно-смесительном диспергаторе / В.П. Базуев, О.В. Матвиенко, В.Л. Вороненко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 4. – С. 121–128.
4. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с.
5. *Матвиенко, О.В.* Численное исследование перехода к турбулентному режиму течения внутренних закрученных потоков битумных вяжущих / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Южанова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2. – С. 132–143.

6. *Jones, W.P.* The calculation of low Reynolds number phenomena with a two–equation model of turbulence / W.P. Jones, B.E. Launder // Int. J. of Heat Mass Transfer. – 1973. – 16. – P. 1119–1130.
7. *Матвиенко, О.В.* Анализ моделей турбулентности и исследование структуры течения в гидроциклоне / О.В. Матвиенко // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 2. – С. 58–64.
8. *Piquet, J.* Turbulent Flows: Models and Physics / J. Piquet. – Berlin: Springer, 1999. – 390 p.
9. *Гупта, А.* Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М. : Мир, 1987. – 588 с.
10. *Халатов, А.А.* Теория и практика закрученных потоков / А.А. Халатов. – Киев : Наукова Думка, 1989. – 192 с.
11. *Матвиенко, О.В.* Исследование динамики пузырька в закрученном потоке нелинейно-вязкой жидкости / О.В. Матвиенко, М.В. Агафонцева, В.П. Базуев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 144–156.
12. *Матвиенко, О.В.* Математическое моделирование течения закрученного потока псевдопластической жидкости в цилиндрическом канале / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Южанова // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 3. – С. 544–547.
13. *Матвиенко, О.В.* Математическое моделирование течения закрученного потока дилатантной жидкости в цилиндрическом канале / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Южанова // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 1. – С. 192–199.
14. *Матвиенко, О.В.* Численное исследование структуры течения и теплообмена при течении битумно-дисперсных систем в цилиндрических каналах / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, Н.К. Дульзон, Н.Г. Смирнова, М.В. Агафонова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2 (43). – С. 80–93.
15. *Кнэпп, Р.* Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 678 с.

REFERENCES

1. *Matvienko O.V.*, *Bazuyev V.P.*, *Turkasova N.G., Baigulova A.I.* Issledovanie protsessa modifikatsii bituma v inzhektornom smesitele [Investigation of bitumen modification in injector mixer]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. 202–213. (rus)
2. *Matvienko O.V., Efa A.K., Bazuev V.P., Evtyushkin E.V.* Chislennoe modelirovanie raspada turbulentnoi strui v sputnom zakruchennom potoke [Numerical simulation of the collapse of a turbulent jet in the wake swirling flow]. *Russian Physics Journal.* Special issue 'Applied problems of continuum', 2006. 49. No. 6. 96–107. (rus).
3. *Bazuyev V.P., Matviyenko O.V., Voronenko V.L.* Modelirovaniye protsessa modifitsirovaniya bituma v kavitatsionno-smesitelnom dispergatore [Modeling of bitumen modification in a cavitation mixing dispersing agent]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010. No. 4. Pp. 121–128. (rus)
4. *Schlichting G.* Boundary layer theory. New York, McGraw Hill Book Company, 1968.
5. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Yuzhanova N.K.* Chislennoye issledovaniye perekhoda k turbulentnomu rezhimu techeniya vnutrennikh zakruchennykh potokov bitumnykh vyazhushchikh [Computational investigation of internal swirl flows of asphalt binders transited to a turbulent flow]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2013. No. 2. Pp. 132–143. (rus)
6. *Jones W.P., Launder B.E.* The calculation of low Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence. *Int. J. of Heat Mass Transfer*, 16, 1973. Pp. 1119–1130.
7. *Matvienko O.V.* Analiz modelei turbulentnosti i issledovanie struktury techeniya v gidrotsiklone [Analysis of turbulence models and investigation of flow structure in hydrocyclone]. *J. Eng. Phys. and Thermophys.*, 2004. V. 77. No. 2. Pp. 58–64. (rus)
8. *Piquet J.* Turbulent Flows: Models and Physics. Berlin: Springer, 1999.
9. *Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.* Swirl Flows. Moscow : Mir, 1987. (transl. from Engl.)
10. *Khalatov A.A.* Theory and practice of swirling flows, Kiev, Naukova Dumka, 1989.
11. *Matvienko O.V., Agafontseva M.V., Bazuev V.P.* Issledovanie dinamiki puzyr'ka v zakruchennom potoke nelineino-viazkoi zhidkosti [Investigations of the dynanics of a bubble in

a swirling flow of a nonlinear viscous fluid]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. Pp. 144–156. (rus).

12. *Matvienko O.V.*, *Bazuyev V.P.*, *Yuzhanova N.K.* Matematicheskoe modelirovanie techeniya zakruchennogo potoka psevdoplasticheskoi zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of pseudoplastic swirling fluid in cylindrical channel]. *J. Eng. Phys. and Thermophys.*, 2011. V. 84. No. 3. 544–547. (rus)
13. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.K* Matematicheskoe modelirovanie techeniya zakruchennogo potoka dilatantnoi zhidkosti v tsilindricheskom kanale [Mathematical modeling of dilatant swirling fluid in cylindrical channel]. *J. Eng. Phys. and Thermophys.*, 2014. V. 87. No. 1. 192–199. (rus)
14. *Matvienko O.V., Bazuev V.P., Dul'zon N.K., Smirnova N.G., Agafonova M.V.* Chislennoe issledovanie structury techenia I teploobmena pri techenii bitumno-dispersnyh system v kanalah [Numerical investigation of flow structure and heat exchange of swirling flows pf disperse bitumen system in cylindrical channels]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 80–93. (rus).
15. *Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G*. Cavitation. New York: Mc Graw Hill Book Company, 1970.

ВНЕ РУБРИКИ

Леониду Семеновичу Ляховичу 80 лет

12 сентября 2014 г. доктору технических наук, профессору, академику Российской академии архитектуры и строительных наук (государственная академия), заслуженному деятелю науки и техники России, почетному строителю России Леониду Семеновичу Ляховичу исполняется 80 лет. Он учился в Новосибирском инженерно-строительном институте и окончил его в 1955 г. С 1956 г. трудится в Томском государственном архитектурно-строительном университете. Ассистент, доцент, заведующий кафедрой «Строительная механика» (с 1964 г. по настоящее время), декан строительного факультета (1965–1968 гг.), проректор по научной работе (1974–2008 гг.).

Научные интересы Л.С. Ляховича связаны с развитием строительной механики, а именно с теорией расчета сооружений на устойчивость и колебания, проектированием систем минимальной материалоемкости. Предложенный им энергетический критерий эквивалентности систем в расчетах на устойчивость и колебания явился основой для развития теории процессов поведения сооружений, в том числе и при обработке результатов неразрушающих испытаний. Сформулированный им метод разделения собственных значений развивает теорию качественного анализа устойчивости и колебаний сооружений.

В теории проектирования систем минимальной материалоемкости предложен подход, позволяющий одновременно учитывать разнородные ограничения и варьировать широким набором параметров сооружений. Выявлен ряд особых свойств систем минимальной материалоемкости. На основе выявленных свойств сформулирован критерий оценки уровня оптимальности полученных решений и предложен метод синтеза оптимальных систем как сооружений, обладающих заранее известными свойствами. По результатам научной деятельности Л.С. Ляховичем опубликовано свыше сотни научных трудов, в том числе 3 монографии, учебники и учебные пособия. Критерий для оценки устойчивости конструкций и их элементов используется на практике и вошёл в расчётно-теоретический справочник строительных конструкций. Результаты научных разработок нашли широкое применение как на отдельных

предприятиях, так и во всей строительной отрасли. Под научным руководством Л.С. Ляховича подготовлено свыше 30 кандидатов и 3 доктора наук.

Л.С. Ляхович известен в системе высшей школы России и как организатор науки. Работая проректором по научной работе университета, Л.С. Ляхович сумел обеспечить рост показателей научно-исследовательской деятельности, что дало университету возможность занять головные позиции в России среди вузов архитектурно-строительного профиля. Под руководством Л.С. Ляховича получила дальнейшее развитие и совершенствование система подготовки кадров высшей квалификации. Заложенные при его участии основы научных направлений и научных школ обеспечивают признание университета и сегодня и способствуют поддержанию передовых позиций в строительной науке.

Постановлением Правительства СССР в 1988 г. при университете был открыт научно-исследовательский институт строительных материалов, директором-организатором которого стал Л.С. Ляхович.

Университет более 15 лет являлся головной организацией Минобразования РФ по научно-технической программе «Архитектура и строительство», а также конкурса грантов по фундаментальным проблемам архитектуры и строительных наук. Л.С. Ляхович является членом Президиума и Ученого совета Российской академии архитектуры и строительных наук.

Организаторский талант Л.С. Ляховича, его научный и личный авторитет, глубокое понимание проблем строительной отрасли позволили ему стать руководителем межвузовской научно-технической программы и конкурса грантов, объединивших исследования более 40 вузов России. Л.С. Ляхович был одним из авторов проблемного плана Минобразования РФ в области исследований по архитектурно-строительному направлению.

По поручению администрации Томской области Л.С. Ляхович с группой учёных активно занимался проблемой повышения эффективности использования интеллектуального потенциала региона, разработкой организационных, экономических и правовых механизмов взаимодействия науки, образования и производства.

Л.С. Ляхович сыграл существенную роль в концентрации усилий ученых и инженерного корпуса на решение важнейших проблем создания эффективных строительных материалов на основе местных сырьевых ресурсов, разработку современных проектных решений в жилищном строительстве, создании экологически чистых систем автономного жизнеобеспечения.

Л.С. Ляхович является председателем совета по защите кандидатских и докторских диссертаций, главным редактором научно-технического журнала «Вестник ТГАСУ», включенного в список ВАК России как ведущее издание. Л.С. Ляхович более 15 лет был членом экспертного совета ВАК по строительству и архитектуре.

В настоящее время Л.С. Ляхович является председателем Комитета Российского союза строителей по отраслевому партнерству в научно-технической области. Комитет координирует деятельность по научно-техническому партнерству в семи федеральных округах Российской Федерации.

Л.С. Ляховича отличает комплексный подход к организационным проблемам, обеспечивающий высокий научный уровень исследований, их тесную связь с образованием и практикой. Он пользуется широкой известностью и авторитетом как ученый и организатор науки.

Л.С. Ляхович награжден орденом Дружбы; медалями «За трудовое отличие», «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина». Он отмечен знаками «За заслуги перед Томской областью», «За заслуги перед городом Томском», «За заслуги перед Томским государственным университетом», «За заслуги перед Томским государственным архитектурно-строительным университетом». Неоднократно награждался грамотами Министерства образования, Министерства строительства, губернатора Томской области, мэра города Томска.

Ему присвоены звания «Заслуженный деятель науки и техники России», «Почетный строитель России», «Почетный строитель Томской области», «Лауреат премии Томской области в сфере науки и образования», «Заслуженный профессор ТГАСУ», «Почетный профессор ассоциации строительных вузов», «Почетный профессор Ростовского государственного строительного университета», «Почетный доктор Воронежского государственного архитектурно-строительного университета».

Отмечен Благодарственным письмом за активное участие в проведении выборной кампании Президента В.В. Путина, подписанное руководителем предвыборного штаба Д.А. Медведевым (2000 г.), Благодарственным письмом Председателя совета Федерации С.М. Миронова за многолетнюю научную и законотворческую деятельность, большой вклад в подготовку высококвалифицированных кадров (2008 г.).

Л.С. Ляхович прикладывает все усилия на повышение престижа строительной науки, высшего строительного образования и развитие строительной отрасли Томской области и России.

ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ

Статья и сопроводительные документы в электронном виде, оформленные с использованием редактора Microsoft Word для Windows версии Word 97/2010, высылаются в редакцию по электронной почте vestnik_tgasu@tsuab.ru, а оригиналы в бумажном виде и на диске по почте по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ТГАСУ, издательство ТГАСУ. Маркировка диска или файлов должна содержать Ф.И.О. автора и название статьи.

При печати использовать стандартные отступы первых строк и оформление абзацев редактором Word.

Статья обязательно сопровождается рецензией специалиста, имеющего ученую степень в данной области, экспертным заключением о возможности опубликования в открытой печати, авторской справкой, сопроводительным письмом и авторским договором. Формы документов и примеры их оформления можно посмотреть во вкладках на странице «Вестник ТГАСУ» на сайте www.tsuab.ru. Документы и авторский оригинал статьи в электронном и бумажном виде (в двух экземплярах), подписанные авторами и научным руководителем (для аспирантов) и заверенные печатью, должны поступить в редакцию на рассмотрение не позднее чем за 3 месяца до месяца публикации.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят обязательное рецензирование в соответствии с требованиями ВАК РФ. Редколлегия оставляет за собой право отклонить статью или возвратить её на доработку. Принадлежность и объем авторских прав на публикуемые в журнале материалы определяются Авторским договором и действующим законодательством Российской Федерации.

Авторское вознаграждение авторам не выплачивается. Плата за публикацию статей не взимается.

Рукописи статей и электронные копии авторам не возвращаются. В случае поступления в редакцию материалов, не соответствующих изложенным выше требованиям, статья к рассмотрению не принимается.

Оформление русскоязычной части

Статья будет рассмотрена редакционной коллегией и рецензентами только при условии ее соответствия нижеприведенным требованиям:

- Объем статьи не должен превышать 10 печатных страниц формата А4, включая иллюстрации и библиографию.
- Все аббревиатуры и сокращения должны быть расшифрованы при первом использовании.
- Содержание файлов на диске должно быть идентично печатному варианту.
- Текст должен быть набран через один интервал, шрифт – Times New Roman, размер шрифта 11 пт, цвет – «Авто» (черный).
- Масштаб – 100 %. Смещение и кренинг отсутствуют. Анимация не используется.

Параметры страницы: левое поле – 2 см, правое поле – 5,9 см, верхнее поле – 3,5 см, нижнее поле – 5,5 см. Расстояние от края до верхнего колонтитула – 2,5 см; до нижнего – 1,5 см;

При наличии в тексте таблиц, рисунков и формул на них должна быть ссылка.

Рисунки и таблицы должны иметь заголовки, размещаемые над таблицей и под рисунком соответственно. Рисунки, таблицы и подписи к ним вставляются

в текст. Кроме того, рисунки, выполненные в любом графическом редакторе, присылаются отдельным файлом в одном из графических форматов: GIF, JPEG, PNG.

Формулы должны быть набраны только в редакторе формул Word 97/2010 (MS Equation 3.0) или в MathType 6.

При наборе текста следует избегать более двух знаков пробела подряд, использования переноса слов в заголовках.

Индекс УДК помещается в левом верхнем углу и набирается прописными (заглавными) буквами.

Ф.И.О. автора (или авторов) должны быть напечатаны в левом верхнем углу прописными (заглавными) буквами после индекса УДК с перечислением научной степени и звания строчными буквами, содержать адрес электронной почты каждого автора и название организации с почтовым адресом, от имени которой подается статья.

Название статьи выровнено по левому краю строки и напечатано прописными (заглавными) буквами.

Аннотация приводится после названия публикации объемом до 0,25 страницы (не менее 500 знаков), где излагается основное содержание статьи с описанием проблематики, методов и результатов исследований. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и малоизвестных или неизвестных сокращений и аббревиатур.

Ключевые слова приводятся после аннотации и отражают основные понятия статьи, определяющие предметную область исследования, актуальность исследования, выстраиваются от общего к частному. Ключевые слова разделяются точкой с запятой, их количество должно быть от 5 до 10.

Библиографический список приводится в конце статьи, которая должна содержать ссылки на весь список в порядке упоминания. Ссылки в тексте на цитируемую литературу даются в квадратных скобках. Рекомендуется в библиографическом списке привести не менее 10 ссылок на научные статьи, в первую очередь, опубликованные за последние 5 лет в рецензируемых научных журналах. Включение иностранных источников в список **обязательно** (не менее 50–70 %). Число цитируемой литературы должно составлять от 15 до 30 ссылок (в обзорной статье – больше). Литература оформляется согласно ГОСТ 7.1 – 2003.

Ссылка на электронный источник должна включать Ф.И.О. авторов, название статьи и название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта и дату обращения к электронному ресурсу.

Сведения об авторах должны содержать: Ф.И.О. авторов (полностью), ученую степень и звание, место работы, должность, телефон и электронную почту.

Пример оформления статьи приведен во вкладке на странице «Вестник ТГАСУ» сайта www.tsuab.ru.

Редакционная коллегия будет признательна авторам, если для экспертной оценки представленной статьи в нее будет включена краткая формулировка, суммирующая значимость полученных результатов по соответствующему научному направлению в разделе «Выводы» или «Заключение».

Требования к оформлению англоязычной части статьи

Транслитерация с русского языка на латиницу производится только через сайт http://ru.translit.net с выбором варианта системы Госдепартамента США (BSI).

Список авторов

После ключевых слов на русском языке приводится список авторов на английском языке, без отчества (*Sergei I. Ivanov*). Затем через запятую степень *PhD* или *DSc* для

степени кандидата или доктора наук соответственно без указания научной области и звание *A/Professor* или *Professor* для доцента и профессора.
Далее англоязычный вариант названия организации с почтовым адресом.

Образец

ALEKSANDR T. OVCHAROV, DSc, Professor,
oat_08@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

Название статьи

Заголовок должен содержать не более 10 слов с целью удобочитаемости и цитирования. **Избегайте использования любых аббревиатур и сокращений**. Точка после заглавия НЕ ставится.

Ключевые слова

Ключевые слова и словосочетания, предоставляющиеся на английском языке, должны быть известны зарубежным коллегам. Ключевые слова и словосочетания разделяются точкой с запятой. В ключевых словах недопустимо использование любых аббревиатур и сокращений; желательно избегать использование предлогов и артиклей.

Библиографический список (References)

Приводится в конце статьи после списка на русском языке. Порядок расположения компонентов описания:

- Транслитерированные фамилии ВСЕХ авторов выносятся на первое место, запятая после фамилии не ставится.
- Убираются специальные разделители (//, –, /).
- После транслитерированного заглавия в квадратных скобках приводится перевод названия статьи на английском языке.
- Меняется № на No.
- Меняются обозначения страниц: С. на Pp.; с. на p.
- Название источника приводится на английском языке (если есть), если нет – транслитерация.
- В конце каждой ссылки пишем (rus), если источник на русском языке.

В описании патентов, трудов и сборников конференций и т. д. все фамилии авторов выносятся на первое место, БЕЗ ПОВТОРА.

Образец:

Русский

Бычков, Д.А. Технико-экономическое обоснование применения новых строительных конструкций и технологий на основе петроситаллов / Д.А. Бычков, А.В. Мананков, Б.С. Страхов // Материалы I Всероссийской молодежной конференции «Россия в Арктике». – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – С. 138–139.

Английский

Bychkov D.A., Manankov A.V., Strakhov B.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya novykh stroitel'nykh konstruktsii i tekhnologii na osnove petrositallov [Feasibility study of new glass-ceramics constructions and technology]. *Proc. 1st All-Rus. Youth Conf. 'Russia in the Arctic'*. Tomsk : TPU Publishing House, 2012. Pp. 138–139. (rus)

В список НЕ ВКЛЮЧАЮТСЯ нормативно-правовые акты, ГОСТ, СНИП и другие подобные источники. Ссылки на них приводятся в тексте статьи в виде сносок.

Курсивом выделяются имена всех авторов, названия сборников статей, материалов конференций и журналов.

Авторам в течение 1–2 дней отправляется уведомление о получении статьи. В случае несоответствия требованиям статья может быть возвращена на доработку. По всем вопросам, связанным с публикацией статей, можно обращаться к зам. главного редактора журнала по электронной почте: ANOVS@tsuab.ru или по телефону (382-2) 65-24-01 и 65-37-61.

Рассылка журнала «Вестник ТГАСУ» производится по подписке. Стоимость подписки на полугодие составляет 600 рублей. Почтовый индекс издания 20424. Подписка осуществляется в почтовых отделениях по Объединенному каталогу «Пресса России» ЗАО «Агентство подписки и розницы».

Внимание, подписка!

Выписать «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» можно в любом отделении связи. Подписной индекс издания в *Объединенном каталоге «Пресса России»* **20424**

Федеральное государственное унитарное предприятие "ПОЧТА РОССИИ" Ф СП-1
Бланк заказа периодических изданий

Ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ на ~~газету~~ журнал **20424**

(индекс издания)

Вестник ТГАСУ

(Наименование издания) | Количество комплектов

На 20__ год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда (почтовый индекс) (адрес)

Кому (фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

~~газету~~ журнал **20424**

(индекс издания)

литер | место

Вестник ТГАСУ

Стоимость: подписки / переадресовки _____руб. _____коп. | Количество комплектов

На 20__ год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда (почтовый индекс) (адрес)

Кому (фамилия, инициалы)