

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Е.А. Черная.</i> Перспектива — изобразительное средство композиции в гравюрах Дж. Батт. Пиранези.....	2
<i>Т.А. Дацюк.</i> Прогноз экологической ситуации при проектировании зданий.....	23
<i>С.С. Евтюков, Г. Гинзбург, И.С. Брылев.</i> Проблемы механизма реконструкции ДТП по параметрам процесса торможения двухколесных механических транспортных средств.....	29
<i>В.В. Карпов.</i> Вариационный метод вывода уравнений в смешанной форме для оболочек общего вида.....	34
<i>В.А. Пухкал.</i> Исследование условий применения внутривольных конвекторов с естественной циркуляцией воздуха в системах водяного отопления.....	43
<i>С.В. Репин, С.А. Евтюков, Я Райчык.</i> Оптимизация сроков службы транспортно-технологических машин с использованием информационной системы управления техническим состоянием.....	49
<i>В.М. Васильев, Ю.В. Столбихин.</i> Новый метод защиты канализационных коллекторов от коррозии.....	56
<i>Сюй Вэй, С.П. Заварихин.</i> Планировочная структура традиционных поселений в горных районах китайской провинции гуйчжоу.....	68
<i>А.Ф. Юдина, М.Ю. Пономарёв.</i> Использование «облицовочного» бетона при возведении монолитных зданий.....	75

## **ПЕРСПЕКТИВА — ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЕ СРЕДСТВО КОМПОЗИЦИИ В ГРАВЮРАХ ДЖ. БАТТ. ПИРАНЕЗИ**

Елена Александровна Черная

Кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры рисунка Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.  
E-mail: elena.chernaya.75@mail.ru

### **Аннотация**

Исследование посвящено воссозданию композиционного мышления Джо.- Батт. Пиранези на основании анализа композиции его гравюр, изображающих архитектуру и пространство. Сравнивается его решение композиции графических работ с живописными картинами его предшественников и современников, изображающих аналогичный мотив. Для подтверждения того, что перспектива для него была одним из изобразительных средств композиции в статье осуществлен сравнительный анализ одной гравюры Пиранези («Вид базилики Сан-Паоло Паоло фуори ле Мура из серии «Виды Рима») с перспективной моделью, выполненной при помощи компьютерной программы SketchUp; фотографиями макета и перспективным видом, выполненным при помощи метода архитектора (метода начертательной геометрии).

Автор статьи исходит из того, что на плоскости фиксируются те структурные элементы существующей композиции, которые при сравнении друг с другом наглядно раскрывают ее объемно-пространственные особенности. Для подтверждения этого предлагается подход, при котором фиксация информации на плоскости рассматривается как профессиональное коммуникативное средство, необходимое для формирования объемно-пространственных представлений в мышлении человека о композиции в системе чертежа и изображения.

Для подтверждения данной гипотезы автором осуществлен анализ чертежей Пантеона выполненных Андреа ди Пьетро Палладио и Дж.-Батт. Пиранези. В связи с тем, что в архитектурном проекте, (на чертеже) информация о композиции объекта разбивается на части и представляется системой взаимосвязанных ортогональных видов в статье осуществлен поиск скрытой логики Дж.- Батт. Пиранези и закономерностей раскрытия информации при помощи проекций

### **Ключевые слова**

композиционное мышление, гравюра, перспектива, модель, чертеж, ортогональные проекции, компьютерная модель, образ.

### **Введение**

В настоящее время, можно видеть одну из волн интереса к графическому наследию Дж. Баттисты Пиранези. Было издано много книг следующих авторов: С.А. Торопов (1939), Л.А. Дьяков (1980 г), Н.И. Сорокина (2013 г.), А.В. Ипполитов (2013)., и др., а также каталогов выставок изданных Государственным Эрмитажем (1959 и 2012 г.), Государственным музеем истории Санкт-Петербурга (2008), Государственным музеем изобразительного искусства А.С. Пушкина (1972, 2015 г.) и альбомы гравюр немецкого издательства TACHEN (2001, 2006, 2000 г.).

Обзор отечественных стей выявил двух авторов — Н.И Сорокину (2007а), акцентирующую внимание на творчестве Пиранези в контексте эпохи Просвещения. В 2007 г Н.И. Сорокина защитила кандидатскую диссертацию по этой теме (2007b), В.М. Успенского (2012), который в своем исследовании прослеживал влияние графики Антонио Каналетто на гравюры Пиранези «Vedute di Roma» (проявляющийся в заимствовании композиционных схем и элементов изображения, преувеличение масштабов и др).

Спектр иностранных статей, по интересующей нас тематике разделяется на четыре направления. Первая группа авторов сосредотачивает свое внимание на исследование чертежей (Minor, 2010).

Вторая группа исследователей, проявляет исследовательский интерес к описанию разных серий его гравюр и особенности жанра каприччио хранящихся в разных странах (T. Stoppani, 2009; L. Marchesano, 2010)

Третья группа авторов акцентирует свое внимание на исследование задач на прямую не связанных с архитектурным творчеством — существовавших конструкций изображенных на гравюрах зданий с целью проникновения в их технологию (например, Pizzo, 2011).

Четвертая группа в своих статьях затрагивает тему пространства в его гравюрах в разных его аспектах, в дальнейшем решая свои поставленные разноаспектные задачи (Marcos, 2014).

Из этой группы один автор, оппонент нашему исследованию — Jung-Rak Kim. Он ставит под сомнение историческую точность графического воссоздания архитектурного образа Древнего Рима в жанре «Каприччио». Эту тему признаков проявления точности в гравюрах автор в своей статье не развивает, а сосредотачивает свое внимание на творческом наследии Панини (Kim Jung-Rak, 2013). В нашем исследовании мы стремимся наглядно раскрыть аспект точности и его проявление, на примере гравюр Дж. Пиранези.

В 1995 году в университете Макгилла в Канаде R. J Aitken. защитил магистерскую диссертацию на тему: «Piranesi-Vico: "Il Campo Marzio". Foundations and the Eternal City (Giambattista Piranesi, Italy), под руководством Alberto Perez-Gomes, развивающего феноменологический подход к архитектуре и градостроительству. В рамках этого подхода его ученик предлагает интерпретировать гравюру Пиранези «Кампо Марцио», при помощи своего научного инструментария раскрывает в ней многомерные контекстные связи, обращения свое исследовательское внимание на деталях гравюры (Aitken, 1995).

У читателей нашей статьи может возникнуть вопрос: Что нового может привнести еще одна публикация о знаменитом художнике-графике и архитекторе?. Новизна статьи заключена в использовании авторского метода визуального анализа композиции гравюр для раскрытия их закономерностей организации геометрической структуры композиции, влияющей на формирование образа. Перспектива выступает одним из изобразительных средств композиции. В статье будут использованы сопоставительные ряды фотографий (гравюры, макет и чертежи) и 3-D компьютерная модель (ансамбля собора Св. Петра в Риме). Затрагиваются вопросы роли перспективы как средства композиции в архитектурной графике Пиранези.

Гипотеза исследования — графическая изобразительная культура у Пиранези сформировалась в процессе общения и работы с знаменитыми мастерами разных направлений пластических искусств, что повлияло на формирование композиционного и образное мышления, проявляющееся в приемах его композиции гравюр. Стремление передать и сформировать у зрителя представление о существующей объемно-пространственной композиции (в процессе движения), влияло на структурообразующие принципы композиции его гравюр, на трансформацию визуальной перспективы, на выбор акцентов в композиции изображаемой архитектурной формы.

Анализ изображенных мотивов на гравюрах Пиранези, с позиции существующей композиции и чертежей, поможет выявить особенности изобразительного мышления зодчего и особенности композиции на плоскости.

Пространство — одна из форм (наряду со временем) существования бесконечного и постоянно развивающегося мира. Оно характеризуется протяженностью, объемом, структурой и ограниченностью. Изображаемое пространство имеет границы как визуальные так и определяемые художником на ситуационном плане. В первом случае, границы изображаемого пространства обусловлены визуальной ясностью зрительного восприятия изображаемой архитектуры (границами зрительного восприятия, фиксацией точки зрения, уровнем горизонта на плоскости). Во втором случае рисующий сам расставляет границы изображаемого пространства, что обусловлено решением изобразительной задачи.

## Материалы и методы

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в Фундаментальной библиотеке, хранятся 15 книг с гравюрами Джованни Баттисты Пиранези. Серии гравюр: «Prima Parte di architettura e Prospettive», «Vedute di Roma», «Grottesch», «Carceri», «Della magnificenza ed architettura di Romani», «Antichità romane», «Antichità della Magna Grecia», «Antichità di Pompei» и, редко опубликованные в современных изданиях, «Alcune vedute di archi trionfali, ed altri monumenti inalzati da romani parte de quali si veggono in Roma,...», «Trofeo o sia magnifica colonna coclide di marmo composta di grossi macigni...», «Diverse maniere d'adornare i camini» и др. (см. рис.1).

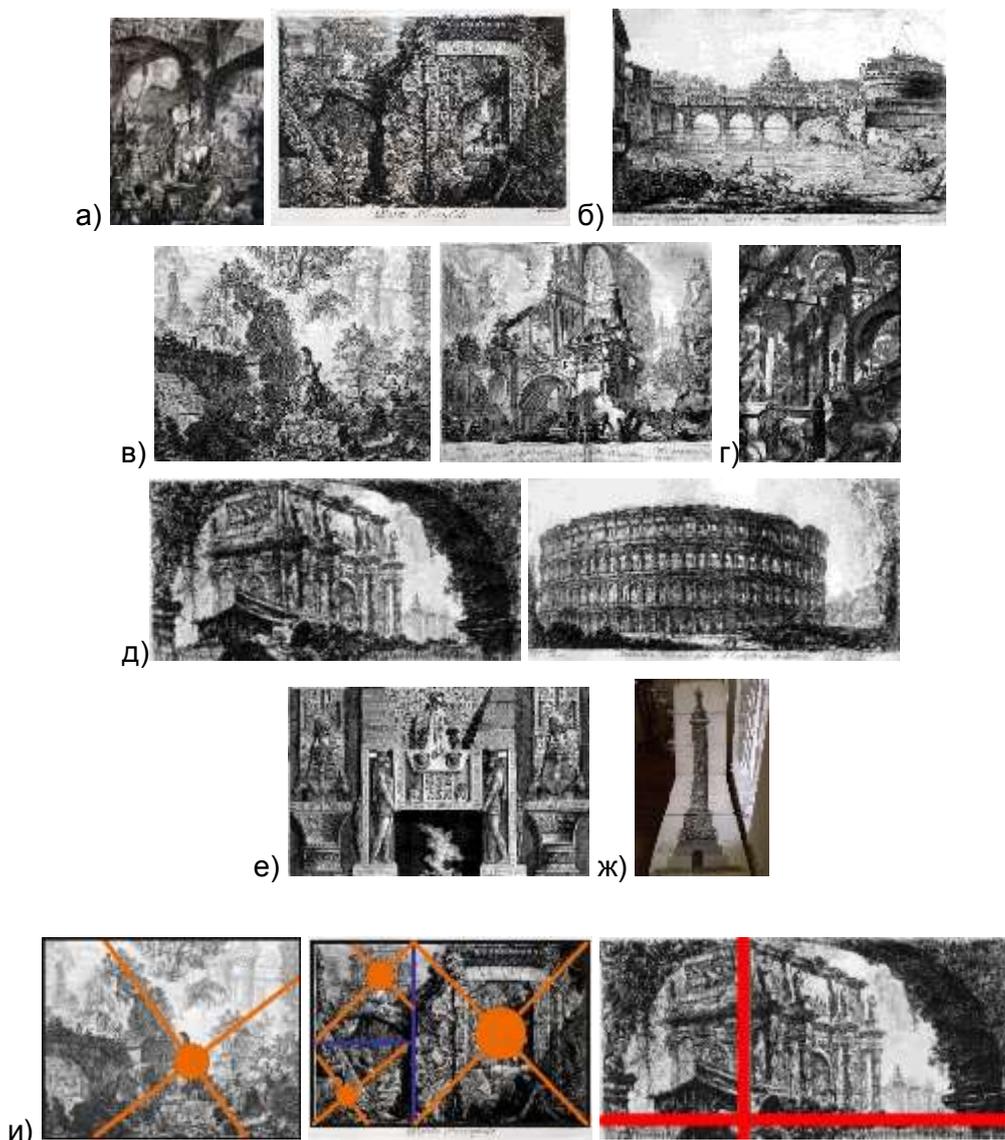


Рис.1. Примеры гравюр разных серий Джо.-Батт. Пиранези: а) 1745 г «Prima Parte di architettura e Prospettive» Первая часть архитектурных и перспективных рисунков составленных и гравированных Джо.-Батт. Пиранези.; б) 1748 г. «Vedute di Roma». Виды римских древностей; в) 1750 г. «Opere Varie di Architettura e Prospettive grotteschi,...» Различные произведения архитектуры, перспективы и античной орнаментики в стиле древних римлян; г) 1760 г «Carceri» Темницы, рисунки Джо.-Батт. Пиранези; д) Издание после 1765 г. «Alcune vedute di archi trionfali, ed altri monumenti inalzati da romani parte de quali si veggono in Roma,...» Виды некоторых триумфальных арок и прочих памятников, воздвигнутых римлянами и находящихся частью в Риме,...; е) 1769 г. «Diverse maniere d'adornare i camini» Различные способы украшения каминов...; ж) 1770 г. (1773–1776) «Trofeo o sia magnifica colonna coclide di marmo composta di grossi macigni...» Трофеи, или великолепная мраморная витая колонна, сложенная из больших каменных глыб; и) два типа геометрической структуры композиции на плоскости: с одним композиционным центром; с композиционным центром и подцентрами; осевая композиция

В статье будут представлена часть увражей, из коллекции СПбГАСУ, наглядно раскрывающих тему данного исследования. В частности нас будет интересовать не техника построения перспективы (из курса «Начертательной геометрии»), а перспектива как средство формирования объемно-пространственных представлений, раскрывающих особенности композиции изображаемой архитектурной формы.

В исследовании для выявления закономерностей существующих в композиции гравюр Пиранези и особенности использования перспективы, применим метод сопоставления моделей изображаемой формы (авторские рисунки-схемы, фотографии макета, компьютерная модель) с гравюрой Пиранези. При этом учитывая единый уровень горизонта на плоскости в процессе изобразительного анализа гравюр.

Пиранези при формировании образа пространства на гравюре учитывает композицию изображаемой архитектуры и пространств, расставляет визуальные границы изображаемого на ортогональном плане и на гравюре фиксирует уровень горизонта на картинной плоскости. Это действие необходимо было ему для ориентации в существующем пространстве, моделирования объемно-пространственной композиции на плоскости листа. Система воздушной перспективы предполагает разделение изображаемого пространства на планы. Оно может быть обусловлено особенностью существующей композиции изображаемых архитектурных форм, выделяющихся из среды за счет своих геометрических, пластики, объемно-пространственных характеристик. Эти объекты — элементы формируют трех плановую структуру композиции гравюры ( см. Рис. 1, б, д). Также на гравюрах Пиранези (см. Рис.1) геометрическая структура композиции на плоскости разделяется на два вида:

а) гравюры в которых один композиционный центр. Он активизирован:

- контрастным противопоставлением одного объекта к его окружению по геометрическим размерам, пластическим характеристикам или особым расположением на гравюре выделяемым перекрестьем диагоналей (см. Рис. 1, и);
- разбивкой гравюры, относительно ее границ, на сектора; с размещением в них подцентров структуры композиции (см. Рис 1, и).

б) гравюры с выраженной вертикальной и горизонтальной осью композиции.

Главный композиционный центр и структурные узлы, помогают зрителю сформировать объемно-пространственное представление о изображаемом пространстве.

Можно предположить, что на количество планов на гравюре влияют следующие факторы: художественная задача; существующая композиция архитектуры; психо-физиология человека – правило Джорджа Миллера « $7 \pm 2$ » (что объясняет принятое в классической картине и гравюре разделение изображаемого пространства на три плана, которые также дробятся еще на три второстепенных плана, и в сумме дают 9 планов).

Одной из характерных особенностей работ Пиранези выступает комплексное владение и знанием перспективы (наблюдательной, линейной, фронтальной, угловой, воздушной). На его работах можно часто обнаружить применение воздушной перспективы (прием, при котором создается иллюзия глубины пространства на плоскости при помощи тонального контраста). Фронтальную перспективу в которой главный фасад здания показывается фронтально, без перспективных искажений, а линии боковых направляются в точку схода. Угловую перспективу, фиксирующую восприятие под определенным углом (все видимые части, все плоскости изображаемого объекта в этой изобразительной системе находятся в сокращении и видны в ракурсе).

В истории изобразительного искусства существует множество систем стремящихся зафиксировать образ пространства, но во всех них плоскость выступает как мера глубины, границ и пластики формы.

Итальянские художники, мастера «каприччо» и «ведуты» были как правило учениками художников-сценографов, перспективистов. Большой известностью в Италии пользовалась семья итальянских художников-декораторов Бибиена-Галии, а также братья Доменико и Джузеппе Валерияни. Они создавали росписи для венецианских театров, дворцов, вилл композиции которых включали архитектурные постройки, чаще всего фантастические, соединяющие разнотипные элементы. Нас будет интересовать композиционный принцип

соединения этих элементов, приемы свидетельствующие о наличии системы, которую возможно и усвоил Пиранези. На рисунке 2, можно видеть двенадцать набросков театральных декораций Джузеппе Галли Бибиены. Лист, из собрания Эрмитажа, представляет собой рабочие наброски, в которых автор осуществляет поиск будущего решения композиции изображаемого мотива.

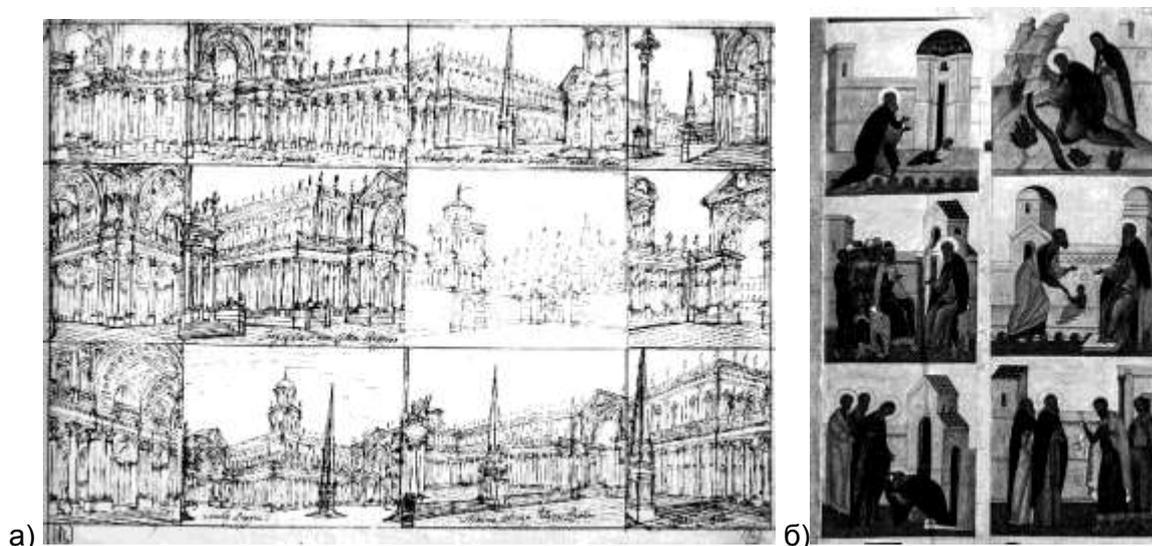


Рис. 2. К вопросу о общности композиционной структуры произведений пространственных искусств, проявляющейся в геометрических комбинациях элементов структуры композиции: а) Фернандо Бибиена XVII в.; б) Фрагменты иконы Преп. Сергия Радонежского в житии (середина XVI в).

В истории изобразительного искусства диагональ:

а) элемент формальной композиции на плоскости организующий ее структуру, связывающий и помогающий сопоставлять главные узлы, направить визуальное движение от элемента к элементу.

б) выявляет свойства объемно-пространственной композиции изображаемой формы и пространства, раскрывающейся во времени с фиксированной и динамической точкой обзора. С точки зрения теории перспективы (начертательной геометрии) диагональ в «построении изображаемых предметов» можно видеть «в том виде, в каком предметы представляются при непосредственном их рассматривании в пространстве» (Рынин, 1918).

Но на рисунке 2(а) можно видеть иную логику построения. Обелиск, арка, колониада — повторяющиеся элементы по разному расположенные на листе, имеют различную площадь пятна. В исследуемом нами рисунке диагональ задействована как связующий элемент структурной Бибиена фиксирует варианты композиционного поиска. Варианты расположения элементов на плоскости (относительно границ рисунка) и связующей их диагонали — формирует в представлении человека разные образы пространства. Наброски имеют разную художественную выразительность связанную с варьированием степени замкнутости пространства. При беглом восприятии зарисовок создается впечатление кадров кино-пленки, но это не так. Это рисунки-схемы фиксирующие авторский замысел, композицию рисунка. В котором существует визуальный главный узел структуры (композиционный центр). С осью равновесия для ближайших к нему элементов именно на него, визуальное направляет диагональ. Этот структурный узел контрастирует с окружением по каким либо геометрическим характеристикам: площади, конфигурации пятна, ритму и т.п. (по принципу «предмет — фона»).

Если совершить временной скачек, и рассмотреть искусство иконописи — фрагмент иконы Преп. Сергия Радонежского в житии (середина XVI в) (см. Рис 2,б), то можно наглядно увидеть общность организации принципа композиционной структуры, проявляющейся в комбинации элементов архитектуры на втором плане иконы (Маточкин, 2006).

Рассмотрение контрастных образцов искусства свидетельствует о существовании единого языка искусства и разных композиционных систем со своими постулатами и принципами, имеющие разные изобразительные средства (аналогичные симиотической конструкцией текста). В рамках которых оттачивалось мастерство формирования образа. По аналогии с архитектурной классикой, где «...никто не ищет новых форм. Ищут совершенство в уже найденных. Пропорции, соотношении масс, фактур, пространств — внутри канонических ордерных решений» (Ревзин, 2013 с.250). Эти слова можно отнести и к искусству гравюры. Таким образом, будем искать индивидуальность решения композиции гравюр по сравнению с работами его предшественников, трудившихся над одним и тем же мотивом.

В начале рассмотрим биографию Джованни Батиста Пиранези (1720 - 1778 г.), только те факты, которые могли повлиять на формирование его авторского стиля. Опираясь на монографию Н.И. Сорокиной (2013), можно выделить следующие события его жизни — он родился в Венеции, где уже был накоплен изобразительный опыт выполнения гравюр в жанре «ведут». Дж. Баттиста Пиранези был соотечественником Джованни Баттиста Тьеполо, Каналетто, Бернардо Белотто, Франческо Гварди. Его отец Анджело Пиранези был «каменщиком», мать Лаура Пиранези сестра «ведущего архитектора в магистратуре (Magistrato alle Acque)» инженера и архитектора Маттео Луккези, таким образом он был окружен профессиональной архитектурной средой и в дальнейшем стремился продолжить профессиональные интересы семьи. Получил азы архитектурной профессии и практику благодаря своему наставнику – дяде. Пиранези знакомится с искусством сценографии и сотрудничает с римскими сценографами Доменико и Джузеппе Валериани. Первая ознакомительная поездка в Рим состоялась в 1740 году. Он принимал участие в ней в качестве рисовальщика при новом венецианском после Франческо Венье. Спустя несколько лет, Пиранези пытается найти работу архитектора в Риме. Его покровителем был Никола Жиоббе, он имел доступ в библиотеку где хранились гравюры, книги по истории, архитектуре, антикварному делу, топографии Рима (графические листы Марко Риччи Джамбаттиста Тьеполо Луки Карлевариуса) (Сорокина, 2013 с. 7–8). Можно предположить, что он видел гравюры ранних и современных ему мастеров. З знакомство на вилле кардинала Алесандро Альбани в Риме с древними артефактами и присутствие на раскопках виллы древнеримского императора Андриана в Тиволи; (Сорокина, 2013 с. 10). Существует мнение, что его учителем был Джузеппе Вази, мастер «видуты» итальянский график и художник.

На основании вышесказанного, исследований (Сорокина, 2013 14) и нашей статьи, можно заключить, что на формирование творческого метода Пиранези влияли следующие мастера искусств:

а) сценографии - Франческо Галли Бибиена, Джузеппе Валериани;

б) живописи и графики — Джованни Антонио Каналь, прозванный Каналетто, Джованна Баттиста Тьеполо, Марко Риччи; Джузеппе Вази и др.



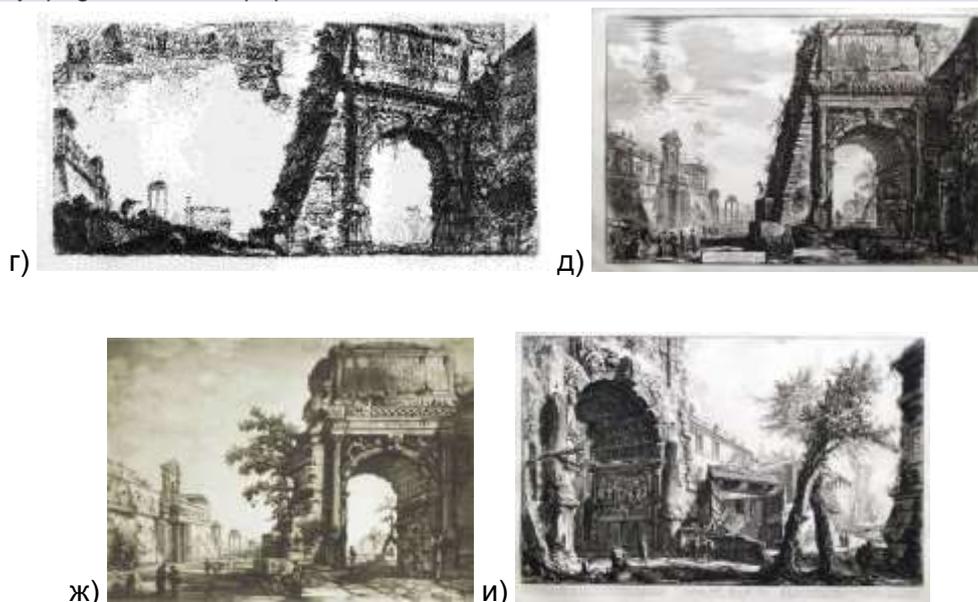


Рис. 3. Работы Джованни Паоло Панини и Дж.-Баттиста Пиранези: а) Арка Тита. Чертеж.; б) Г. Виттель; в) Дж. Панини; г, д, и) гравюры Дж.-Баттиста Пиранези; ж) В.Бренна. Арка Тита. Настенная живопись в Аванзале Каменноостровского дворца. С гравюры Дж.Пиранези. 1796 (по проекту 1781 года). Темпера по штукатурке.

Для выявления индивидуального структурообразующего принципа заложенного в решении гравюр Пиранези, сравним изображение архитектурных форм: арки, пирамиды и амфитеатра выполненное другими живописцами и граверами.

В жанре «капричос» и «ведуты» работали до Пиранези живописцы — голландец Гаспар ванн Виттель (1653–1736) и итальянец Джованни Паоло Панини (1691–1765). (см. Рис. 3, а.). Излюбленными мотивами их изображений, были античные постройки: арка, колоннада, пирамида, круглое в плане здание (Колизей, ротонда), амфитеатр, цирк и т.п. На картинах и гравюрах эти архитектурные формы чаще всего превращались в романтические руины. Рассмотрим работы перечисленных мастеров, например, изображавших Арку Тита. Сравним их произведения с гравюрой Джо.-Батт. Пиранези.

Виттель в своей работе, использовал фронтальную перспективу, которая преобладает над линейной перспективой. Панини решает композицию холста иначе, применяя угловую перспективу создающую на плоскости иллюзию динамики движения, при этом арка теряет свои качества — тяжесть и устойчивость. Панини — формирует динамическую напряженность композиции, активизируя диагональные направления, подчеркивая функцию арки — пропускать людские потоки и направлять их движение. Работы этих авторов создают образ замкнутого архитектурного пространства при помощи протяженности и неразрывности силуэта пятна архитектуры.

В ранней гравюре Арки Тита Пиранези (см. Рис. 3, г) применил угловую перспективу, творчески интерпретировал композицию Г. Виттеля (Рис. 3, б, в.) изменив пропорции работы, арки. На работе, Пиранези создает, пластический и перспективный контраст высот зданий на первом плане по отношению ко второму плану. В этой работе можно видеть схождение диагональных линий на плоскости, ракурсов изображаемой архитектуры одной точке-оси формальной композиции разделяющей левую и правую части гравюры. Что свидетельствует о двойном отношении к перспективе как некой визуальной данности существующей в природе и как средство формирования структуры композиции на плоскости. Несколькими годами спустя, интуитивно найденное решение осознается им и получает развитие в новых его работах над этим мотивом. В композиции гравюр на рисунке 3 (д, и) При помощи контраста в решении правой и левой части гравюры (контраст пустоты и заполненности) Пиранези формирует кинестетическое чувство движения. На плоскости он создает впечатление направляющего архитектурного пространства, при помощи

группировки основных объемов у границ рисунка и диагонали образованной силуэтом архитектуры. Диагональ в его работах выступает, с одной стороны, как визуальная граница света и тени на плоскости, с другой стороны, как изобразительное средство композиции — формальной осью, соединяющей, направляющей к двум центрам.

Другой пример, изображение пирамиды Гая Цестия (12 г. до н.э) В III в. н. э пирамида была соединена со стеной, построенной для защиты города от растущей угрозы нападений варваров. В V в. Император Гонорий вдвое поднял высоту римских башен, включая и эти башни восточных ворот изображенные на гравюре (Рис. 4 а,б,в,г). Визуальный ряд работ с изображением данного мотива показывает еще интересную особенность гравюр Пиранези. Первая, маленькая гравюра – поисковый эскиз, в сравнении с последующей, большой (см. рис. 4 д, е) — раскрывает геометрические особенности пирамиды и близ лежащего пространства 4 (е.). В большой гравюре Пиранези раскрывает информацию о существующем ансамбле. Для этого он вводит характерные архитектурные элементы-ориентиры, несущие информацию о пространстве вокруг пирамиды (для этого он разламывает и отодвигает правую стену от пирамиды). Таким образом подчеркивая объемно-пространственную композицию. На гравюре стаффаж — малые архитектурные формы, деревья и тучи, ритм теней на зданиях помогали Пиранези раскрыть информацию о форме и пространстве, которая не могла во всей полноте быть передана с помощью применения одного лишь изобразительного средства перспективы. Деталь выполняет связующую роль в структуре работы, раскрывающей как архитектурный (объемно-пространственный), так и художественный образ.

Влияние детали на изменение образа мы раскроем в сравнительном анализе работ Пиранези и Россини изображавших пирамиду Гая Цестия (см. рис.4 и,л).

Итальянский художник и архитектор XIX-го века Луиджи Россини (1790–1857) был последователем творчества Пиранези, его гравюры часто путают с произведениями его предшественника. В чем кроется причина такого сходства? Возможно, в повторении его структуры композиции. При буквальном ее копировании и изменении, например, одного из узлов исходной композиции (его геометрии структурных узлов) приводит к созданию новой комбинации структуры несущей иное представление о изображаемой объемно-пространственной композиции и следовательно образа. Если рассмотреть исходную работу Россини (Рис. 4, л) и зеркально ее повернуть (Рис. 4, к), то композиционная структура работы повторяет гравюру Пиранези на рисунке 4 (и). Таким образом, Россини повторил зеркально композицию Пиранези (см. Рис. 4, и), изменив только правую часть композиции добавив дерево (см.Рис. 4, к). Работа у Россини имеет тот же уровень горизонта на картинной плоскости, что и у Пиранези (см. Рис. 4 л, ж.). В его работе в композиции гравюры диагональ соединяет структурные элементы и ее ход остановлен не в середине работы, как у Пиранези (диагональю тучь), а на краю границ изображения (диагональю дерева).

Чтобы проверить наше предположение рассмотрим еще одну работу Луиджи Россини «Amphiteatrum Castrense» (см. Рис 5, б, в). Композиция его работы компилирует решение композиции двух работ Пиранези (см. Рис. 5 б, в), оставляя решение главной их структуры, он корректировал детали — архитектурные детали, деревья, тучи, рельеф земли (изменяя их геометрию) и, изменяя высоту уровня горизонта на гравюре, сформировал новый образ (см. Рис 5, г).

Выявленный прием работы Луиджи Россини может лечь в основу новых учебных заданий для студентов-реставраторов, направленных на формирование «чувства стиля», композиционных навыков стилизации, развитие их фантазии и воображения. Так как это путь не прямого, технического копирования произведения мастера, а изучения его композиционных принципов архитектурной графики и путь творческой интерпретации композиции на основе исходной.

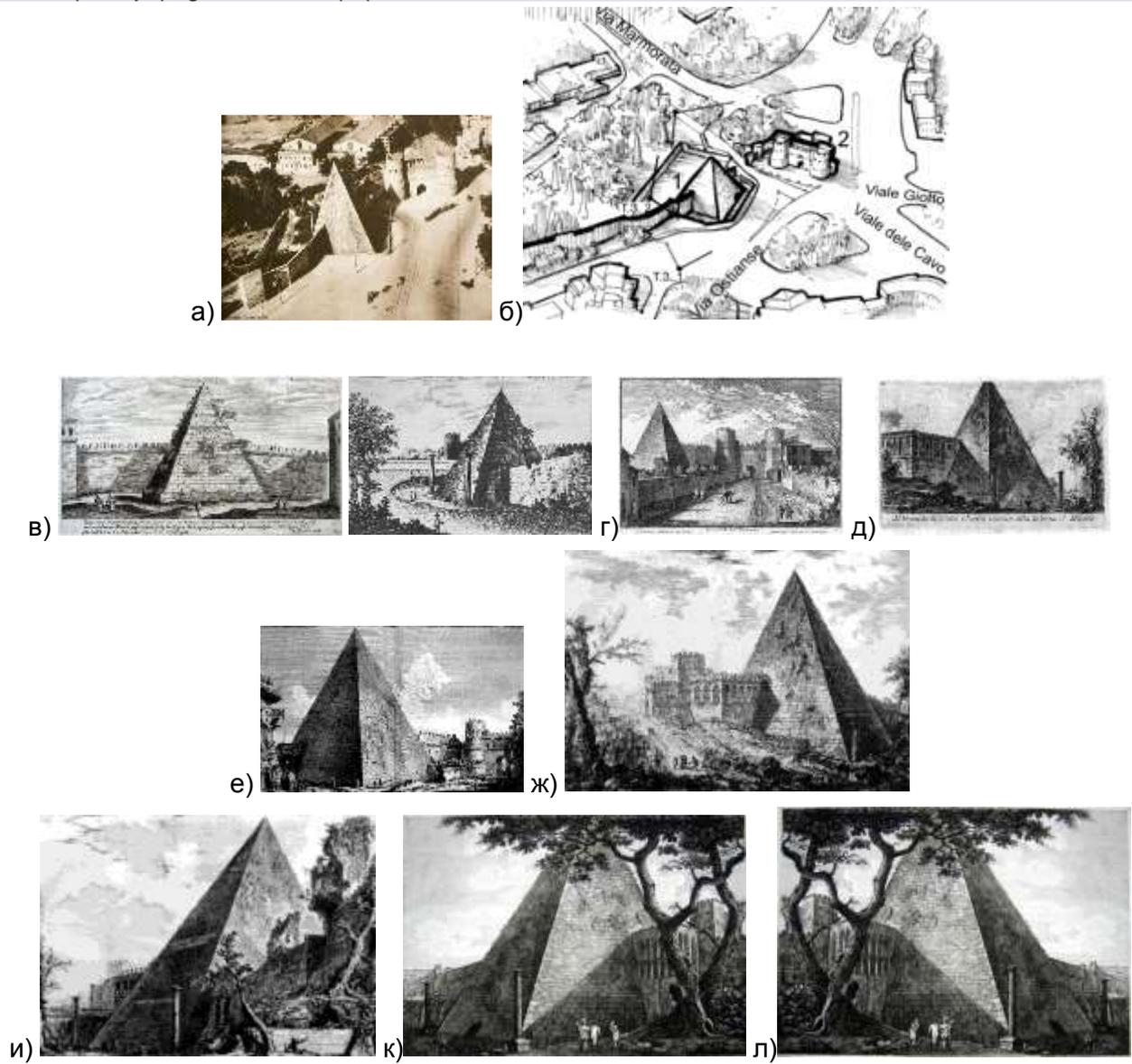
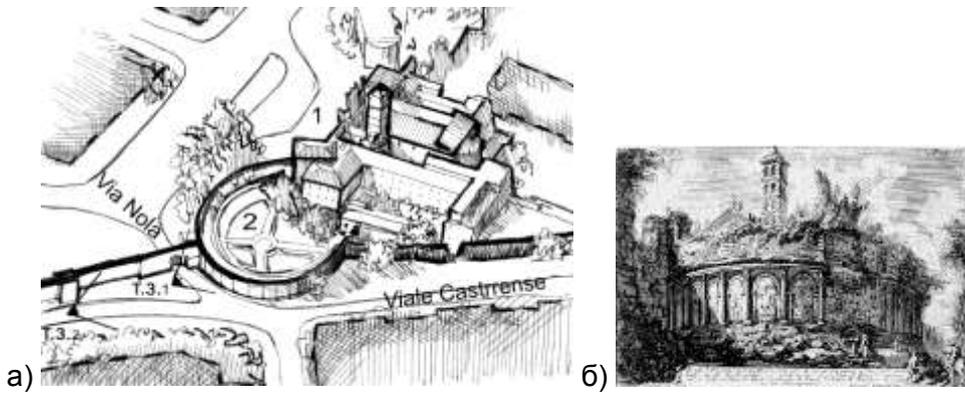


Рис. 4. Пирамида Гая Цестия: а) ситуационный план с показом пирамиды и ее окружения б) изображение пирамиды на гравюрах Дж.-Батт. Пиранези; в) Саделер Марко, 1606 г. Автор второй гравюры не известен.; г) Джузеппе Вази; д, е, ж, и) Дж.-Батт. Пиранези к,л) Луиджи Россини.



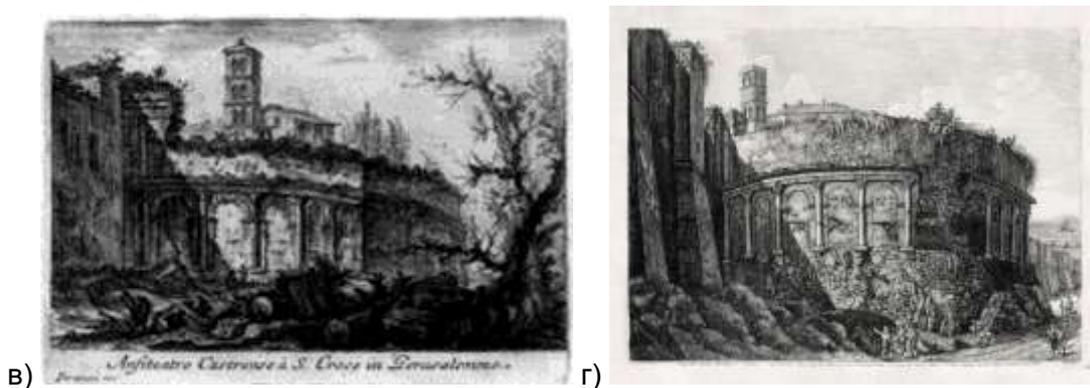


Рис. 5. Ситуационный план расположения амфитеатра Castrense; б) Гравюра Дж.-Батт. Пранези; в) Agostino Tofanelli. Amphitheatrum Castrense. 1833 г.

Рассмотрим существующие методы анализа композиции произведения изобразительного искусства. В настоящее время, в теоретико-искусствоведческих исследованиях в работах С.М. Даниэля, В.М. Машкова, О.И. Кузнецова и др. при рассмотрении структур, композиции картин или гравюр применяется анализ плоскостной, формальной композиции, составных ее частей (линий, пятен и др.). Исследователи вели поиск закономерностей организации «плоской геометрической структуры», скрытых схем ритмов и пятен в рассматриваемых ими произведениях. В других трудах — В.А. Мельникова (2007) и Л.С. Нейфах (2009), можно видеть иное направление анализа, контрастное предыдущему, поиски «объемной геометрической структуры» (поиск закономерностей организации пластики рисунка формы, геометрии, ритма и принципов движения плоскостей объемной формы). Они воссоздают объемно-пространственную геометрию формы изображенных на рисунке объектов на основе опорных точек и линий на картине или гравюре, стремясь раскрыть принципы пластической трансформации изображаемой формы. Иной путь предложил исследователь Л.Ф. Жегин, — метод показа «геометрической структуры силовых полей» рассматриваемого образца искусства (Жегин, 1970). Он использовал понятия и инструментарий начертательной геометрии (точка схода, точка зрения, зрительный луч) для раскрытия особенности скрытой линейной пластики композиции икон, фресок. Для Жегина, композиция «развивающаяся» структура, имеющая стадии и фазы (см. Рис. 6).

Иной путь направление, направление интерпретации плоскостной композиции в объемно-пространственную модель (3-D) предложили А. Ефимов и Н. Попова для студентов архитекторов-дизайнеров.

Всех перечисленных выше исследователей роднит принципы:

- а) точного повтора и обобщенного калькирования пятен и линий формы, изображенной на произведении;
- б) поиск «ключа» организации объемно-пространственной и плоскостной композиционной целостности исследуемых произведений;
- в) анализ одного произведения и упущение всего наследия исследуемого мастера (см. Рис. 6).

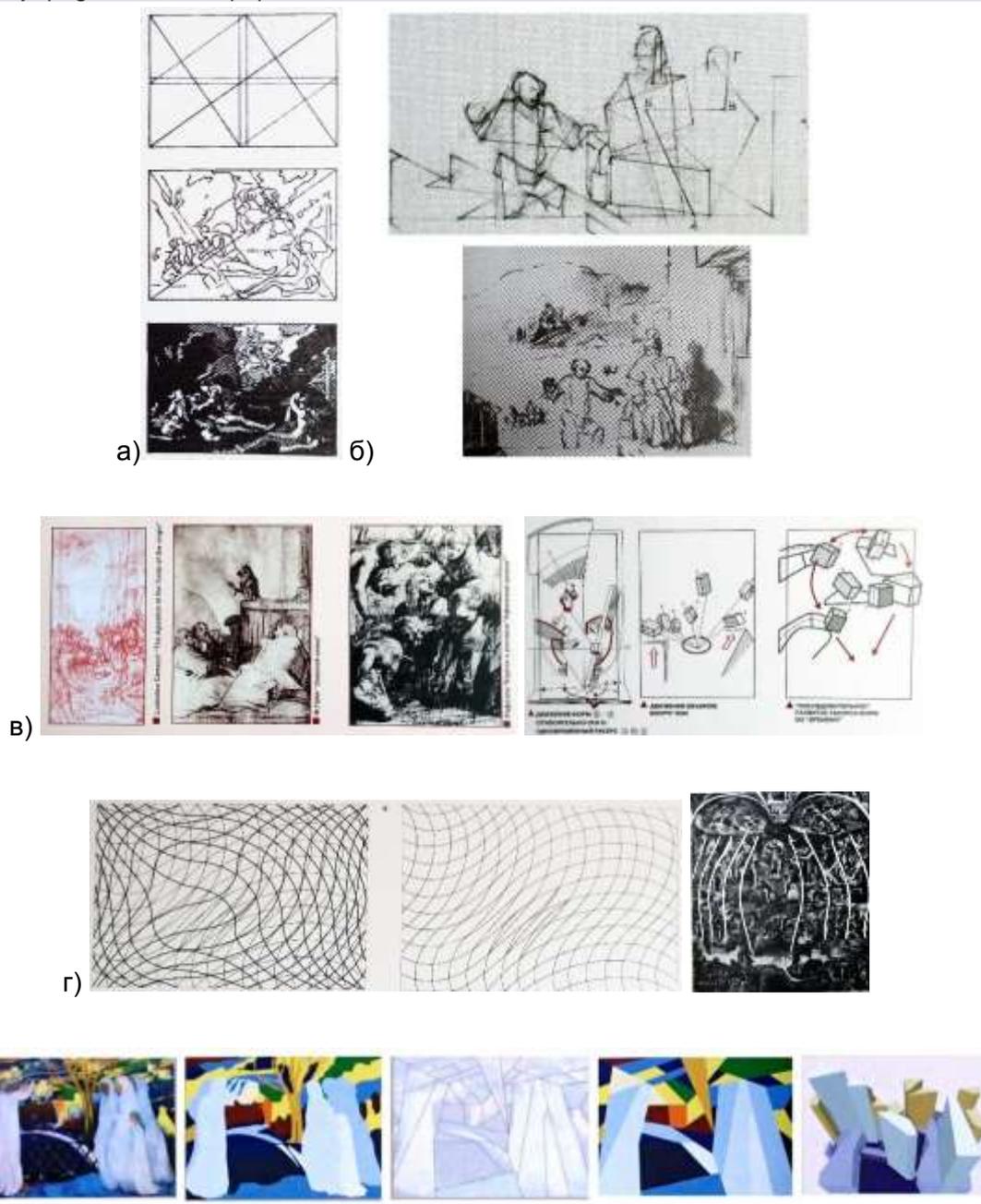


Рис. 6. Методики анализа композиции произведений графики и живописи: а) «плоской геометрической структуры» (С.М. Даниэль); б) «объемной геометрической структуры» (Л.С. Нейфах) ;в) «принципа организации объемной геометрической структуры» (В.А. Мельников, УГНТУ) ;г) «линейной пластической структуры композиции» рассматриваемого произведения Л.Ф. Жегин; д) интерпретация плоскостной композиции в объемно-пространственную формальную модель (А. Ефимов, Н. Попова, МАРХИ).

Оригинален предлагаемый В. И. Локтевым метод раскрытия архитектурной композиции существующих зданий построенных в стиле Барокко. Он, на материале итальянского искусства исследует проблему художественного стиля XVI–XVII вв. в архитектуре, живописи, скульптуре, музыке, сценографии. На авторских рисунках-схемах изображающих архитектуру он графически имитирует композиционно-образное мышление художника, на примере творчества Микеланджело Буонарроти. Композиционное мышление — процесс поиска архитектором соотношений и соподчиненности частей друг другу и целому. По его мнению, данный метод необходим студентами-архитекторами и реставраторами архитектурных стилей для активизации процесса изучения архитектурной композиции (см.

рис. 7). Мы остановились на его графическом методе потому, что он, на основе рисунков-схем зданий стремился найти вербальную форму раскрытия мышления художника, направленного на раскрытие организации структуры композиции здания. В набросках он графически (стрелками, скобками) фиксирует процесс своего визуального мышления направленного на анализ композиции здания, перемещая свое внимание от одного элемента к другому и сравнивая их и здесь же делая выводы. Он активизирует глаза человека на рассмотрение объекта, его частей при этом они совершают как малые, так и большие скачки (Ярбус). Такие скачки, мы видим в рисунках Локтева в процессе профессионального изобразительного анализа. Таким образом, линейные рисунки-схемы, раскрывают его визуальные аналитические действия, в частности сравнение:

- а) малых и больших геометрических членений формы по горизонтали и вертикали;
- б) частей (архитектурных деталей) и малых групп — узлов формы между собой и членениями формы.

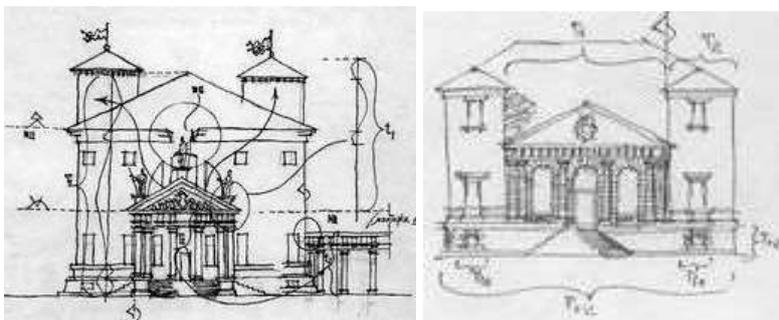


Рис. 7. Метод анализа архитектурного здания, имитирующий процесс композиционного мышления (В. И. Локтев)

В.М. Соняк исследовательское внимание направил на анализ существующей композиции изображаемой архитектуры при помощи ортогональных проекций, видов — чертежа и перспектив (Соняк, 1985). В данной статье в связи с тем, что исследуемые архитектурные объекты нам недоступны мы будем пристально изучать их чертежи.

Изображение - модель осознаваемого пространства (А.В. Иконников). Как и любая модель предполагает подобие воспроизведение на плоскости геометрических, пластических и композиционных характерных и др. изображаемых форм и пространств. Образ, с одной стороны, выступает как результат познавательной деятельности субъекта, его сложившихся образных представлений, опирающихся на долговременную память субъекта, с другой стороны, — результат соединения в границах изображения на плоскости разновременных частей архитектурной формы или пространства (элементов).

В процессе своей деятельности архитектор на прямую не работает с материалом, из которого создается архитектурная форма, как например в скульптуре. Он использует графику как технический посредник для наглядного формирования у ее потребителя представлений о будущей материальной форме. Для активизации чувства материала на плоскости он применяет художественные средства графики: композицию, перспективу, пропорции, светотень, цвет, штрих, фактуру, и т. д. Он организует их системную работу так, чтобы они воздействовали на человека и вызвали эмоционально-чувственную реакцию — чувство материала.

Архитектор, используя язык графики как коммуникативное средство. На чертеже он акцентирует свое изобразительное внимание на одних элементах композиции и упускает другие. Рассмотрим архитектурную графику Андреа ди Пьетро Палладио (1936) и Дж.-Батт. Пиранези — чертежи Пантеона, с целью выявить логику раскрытия информации о форме при помощи проекций.

В своем фундаментальном трактате «Четыре книги об архитектуре» Палладио рассказывает о знаменитом храме Рима — Пантеоне (именуемым в его время Ротондой) о его внешней и внутренней особенности архитектурой формы, украшений, конструкции. Для наглядности он

представил в своем труде сопроводительный текст к десяти таблицам (чертежам). Примечателен письменный перечень таблиц, который дает представление о его композиционный сценарий действий, разбитый на три шага:

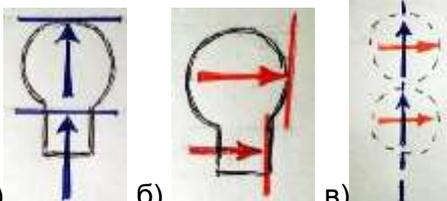
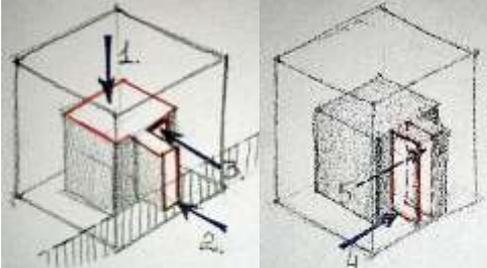
- 1) план; главный фасад; совмещение фасада и разреза раскрывающий конструкцию формы;
- 2) боковой фасад; боковой разрез этого же фасада, особенности украшения фасада и детали портика;
- 3) разрез основной формы напротив входа; фрагмент интерьера; детали (украшения) внутреннего здания, и их профили (Маточкин, 2006).

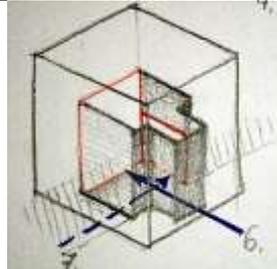
На основании рассмотрения чертежей Пантеона можно утвердительно сказать, что просматривается закономерность. Для ее наглядного выявления мы используем аксонометрию — упрощенную модель формы Пантеона. Схематичные рисунки будут фиксировать основной объем здания и сценарную последовательность раскрытия информации об объекте при помощи цепи ортогональных проекций, обозначенные цифрами; стрелками путь визуальной фиксации как внешних границ формы, так и внутреннего пространства, при помощи движения в глубину ортогональной плоскости. Анализ чертежей показал, что архитектор, для раскрытия информации о форме, каждый шаг, движения в глубину фиксировал фронтальной проекцией и видом с боку. При этом сценарное скачкообразное движение в глубину активизировало поперечно-продольные оси (см. таблицу 1.)

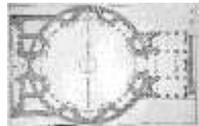
В чертежах, выполненных Дж. Батт. Пиранези с одной стороны сохраняется принцип скачков, но с другой стороны, просматривается новизна приема организации архитектурной информации об объекте — стремление зафиксировать форму и пространство со всех сторон света. Он противопоставляет проекции чертежа на 180 градусов. В архитектурной графике идет раскрытие контрастной информации о границах формы как с внешней (см. Таблицу 1, рис. 5 и чертежи 3,4,5,6), так и с внутренней стороны (см. Таблицу 1, рис. 5, чертежи 1,2,7,8,9,10,11). Фиксация не частей а целой формы его внешнего и внутреннего вида при помощи зеркального противопоставления четырех проекций. Задействуются почти все объемно-пространственные оси, фиксирующие центр и границы формы. В художественных гравюрах Пиранези, можно видеть прием контраста столкновения противоположного, например, линейной и фронтальной перспектив ( см. Таблицу 1, гравюры 10,11).

Таблица 1

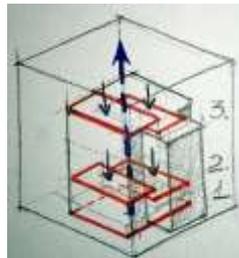
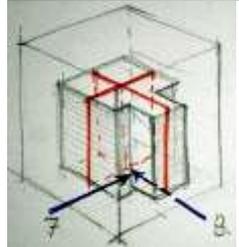
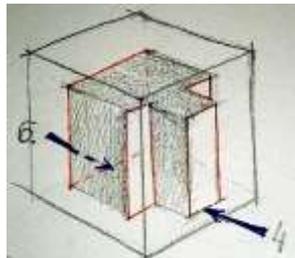
Два контрастных приема передачи архитектурной информации о Пантеоне при помощи чертежа — А. Палладио и Дж. Б. Пиранези.

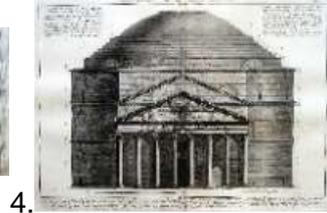
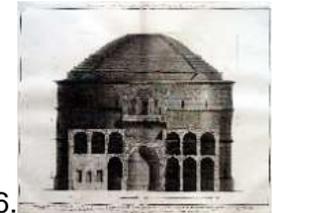
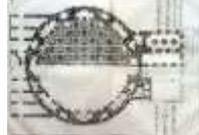
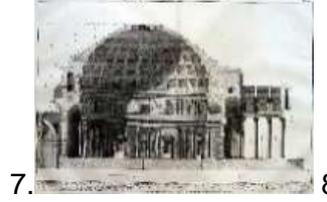
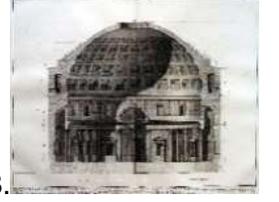
Андреа ди Пьетро Палладио.. Венеция, 1570 г. (Листы с чертежами Пантеона в Риме из книги «Четыре книги об архитектуре», с.76,77, 78.) (Палладио, 1936)	
Пространственные поэтапные модели передачи информации о Парфеноне на чертеже.	
	.а) б) в) Принцип передачи информации на чертеже — «движение и остановка (плоскость). Поэтапное движение в глубину и в бок, фиксируя пространственное положение формы на двух его планах). Последовательность раскрытия информации об архитектурной

	<p>форме при помощи чертежа:                  а) фронтальные фасады и разрезы; б) боковые фасады и разрезы;                  в) ось движения а глубину; фиксация пространства при помощи пересечения контрастных фронтальных направлений.</p>
---	---

1. 	2. 	3. 	4.  5. 	6. 	7. 
---	---	---	--	---	---

Джованни Баттиста Пиранези  
 (гравюры из книги гравюр хранящейся в СПбГАСУ)

 		<p>Принцип передачи информации на чертеже — «противодействие сил» (контрастные точки обзора объекта и интерьера, противостояние внешнего и внутреннего пространства).</p> 
---	--	--

1. 	4. 	5. 	6. 
2. 	7. 	8. 	
3. 	9. 	10. 	11. 

Предположим, что принцип свойственный архитектурной графике Пиранези он использовал и в своих перспективных видах на гравюрах (для раскрытия композиционных качеств изображаемого объекта с перемещающейся точки восприятия). Для проверки нашей гипотезы рассмотрим гравюру с изображением базилики Сан Паоло фуори ле Мура.

Базилика Сан Паоло фуори ле мура одна из четырёх наиболее почитаемых базилик Рима. Расположена за Аврелиановыми стенами, в южной части Рима. Была заложена в начале IV века по приказу императора Константина на древнем кладбище, на месте гробницы Святого Павла в которой, по приданию, благочестивая римская матрона Люцина захоронила остатки апостола (Зимин, 2012). В отличие от остальных патриарших базилик, собор св. Павла за стеной не претерпел существенных изменений ни во времена Возрождения, ни в эпоху барокко, однако 15 июля 1823 г. выгорел почти дотла. Восстановление храма продолжалось до 1840 г., причём был выстроен совершенно новый классицистический фасад, который мы можем видеть в настоящее время. Офорт Гаэтано Cottafavi показывал Сан Паоло фуори ле мура после 1823 огня. (см. Рис. 9, в). Таким образом, мы не можем увидеть тот вид базилики изображенный на гравюре Пиранези. Ранее парадный фасад в настоящее время выходит в перестильный двор (см. Рис.8).

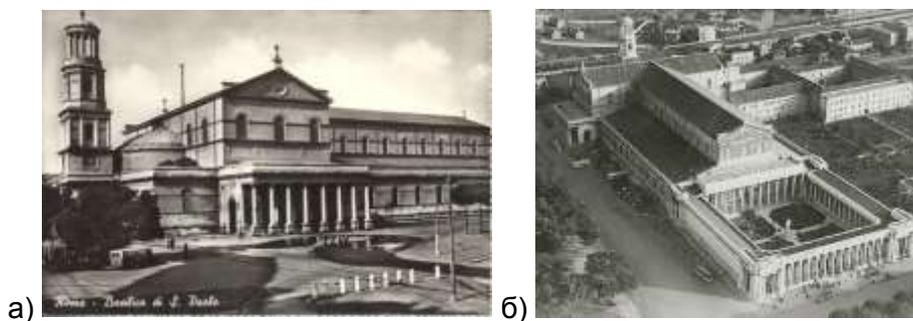
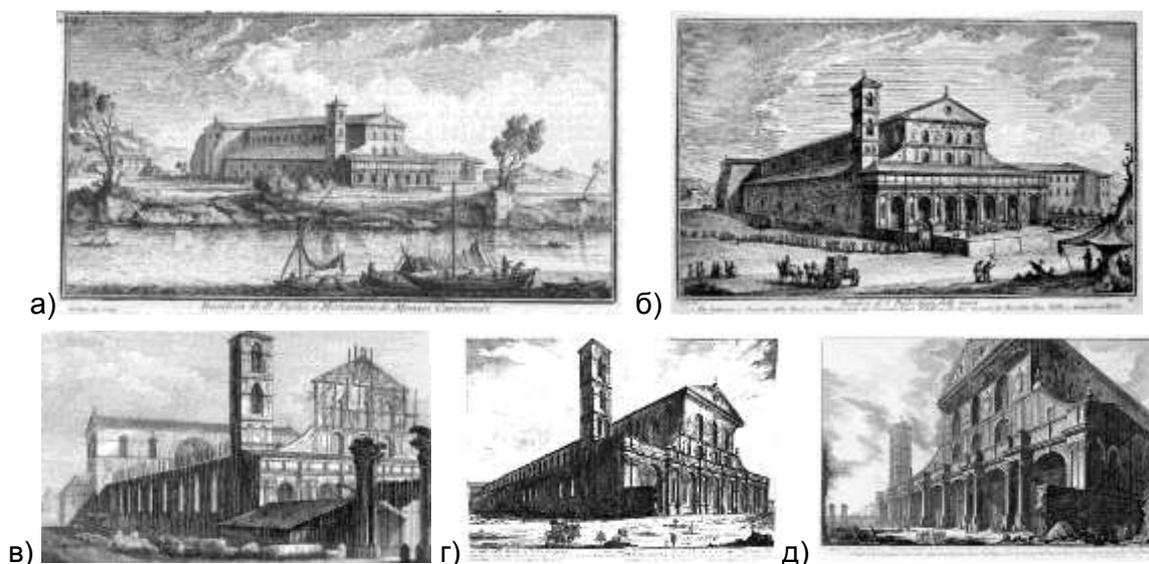


Рисунок 8. Сан-Паоло Фиори ди Мура: а) современный вход в базилику; б) старый вход в базилику, фасад восстановлен после пожара в 1823 г.



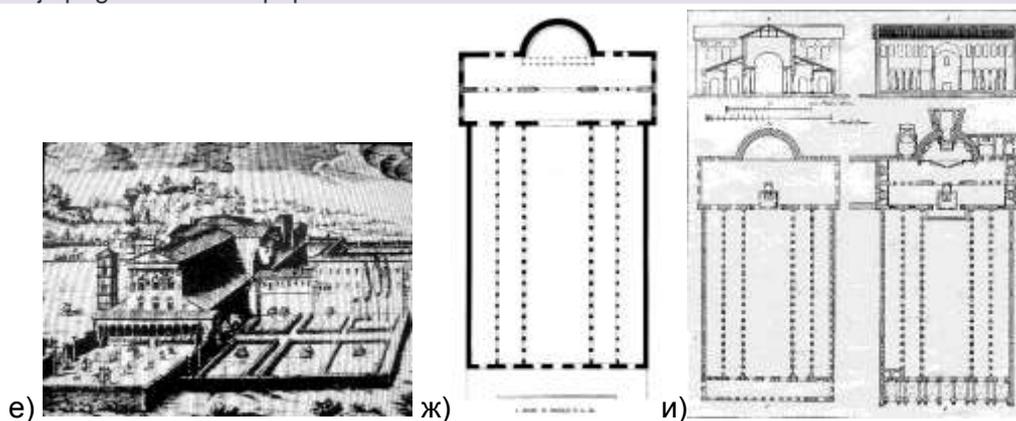


Рис. 9. Изображение базилики Сан Паоло фуори ле Мура на гравюрах:  
 а) Джузеппе Вази 1745–1765 г.; б) Коллекция самых красивых видов древнего и современного Рима, на основе оригинальных гравюр Джузеппе Вази; в) после пожара в 1823 году. Gaetano Cottafavi; г) Жан Барбо. 1748 год; д) Дж. Б. Пипанези. 1947 г. Серия «Виды Рима»; е) старинная гравюра из книги. Дипннные пока не найдены. Планы базилики Сан Паоло фуори ле Мура: ж) план (интернет ресурс); и) план базилики до пожара (интернет ресурс)

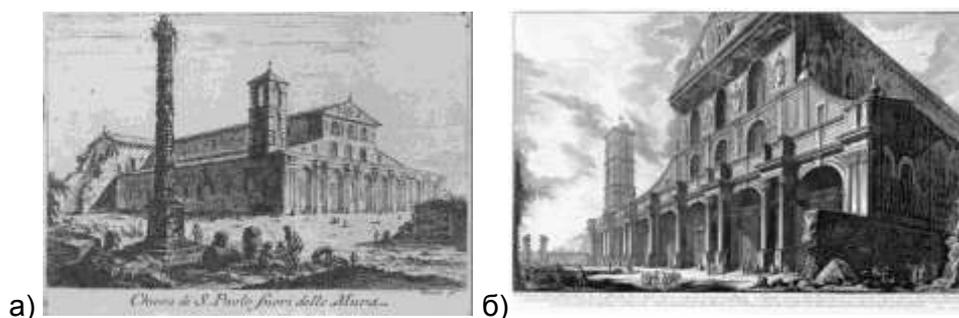


Рис. 10. Базилика Сан Паоло фуори ле Мура из серии «Виды Рима» Джо.-Батт. Пиранези

На рисунке 9 можно видеть собранный материал гравюры и чертежи базилики Сан-Паоло фуори ле Мура. Существуют две гравюры базилики выполненные Пиранези (см. Рис.10)

Сравнивая гравюру Пиранези с изображением базилики предыдущими работами других авторов можно видеть принципиально иное решение. Создание впечатления величественности базилики в картинном пространстве как результат выстроенной целостной системы взаимосвязующей все ее элементы несущие информацию:

- как о композиции существующей изображаемой формы — информации о центре, границе и пространстве (ее оси, членения, ритм, доминанты и т.п.);
- так и формальной композиции на плоскости в которой задействованы пятна, линии, контрасты, перспектива, композиционный центр, элементы структуры и границы гравюры).

При восстановлении точек схода на гравюре и сопоставление с чертежом (планом базилики), мы пришли к заключению, что такой точки с линией горизонта не может быть. Ширина галереи в линейной перспективе должна быть больше, как показано на рисунке 11 (а, в.). Силуэт продольной стены базилики должен быть иным, не таким треугольным. Значит Пиранези, изменил точку схода с права, приблизив к центральной оси формы для зрительного выделения центральной части здания (оси перспективного равновесия), подчеркнув, тем самым центр и ось архитектурной композиции (см. Рис. 11, а, б).

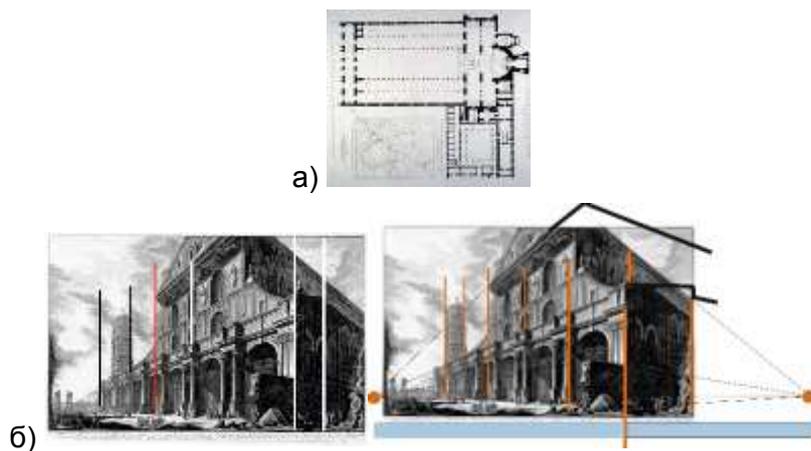


Рис. 11. Анализ перспективы базилики Сан Паоло фуори ле Мура из серии «Виды Рима» Джо.-Батт. Пиранези: а) план базилики; б) анализ перспективы.

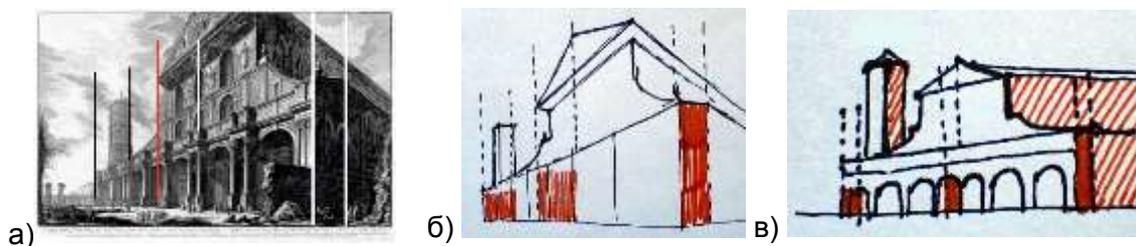


Рис.12. Использование методов начертательной геометрии для анализа перспективного вида базилики Сан-Паоло фуори ле Мура на гравюре Дж. Баттисты Пиранези: а) гравюра; б) рисунок-схема перспективы базилики на гравюре с показом переменной глубины крытой галереи; в) рисунок-схема перспективы базилики построенной методом архитектора (метод начертательной геометрии).

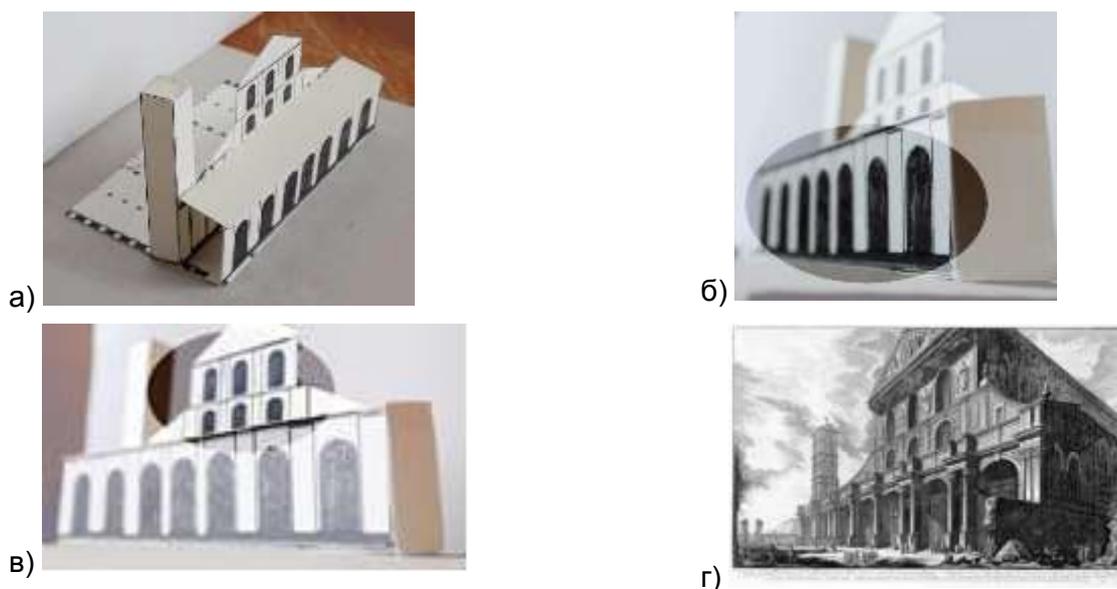


Рис. 13 . Использование макета для анализа перспективы базилики Сан Паоло фуори ле Мура на гравюре Дж. Баттисты Пиранези: а) рабочий макет; б) ракурс крытой галереи аналогичен ракурсу на гравюре с точки зрения ритмического ряда; в) ракурс решения верхних окон базилики приближен к решению на гравюре.

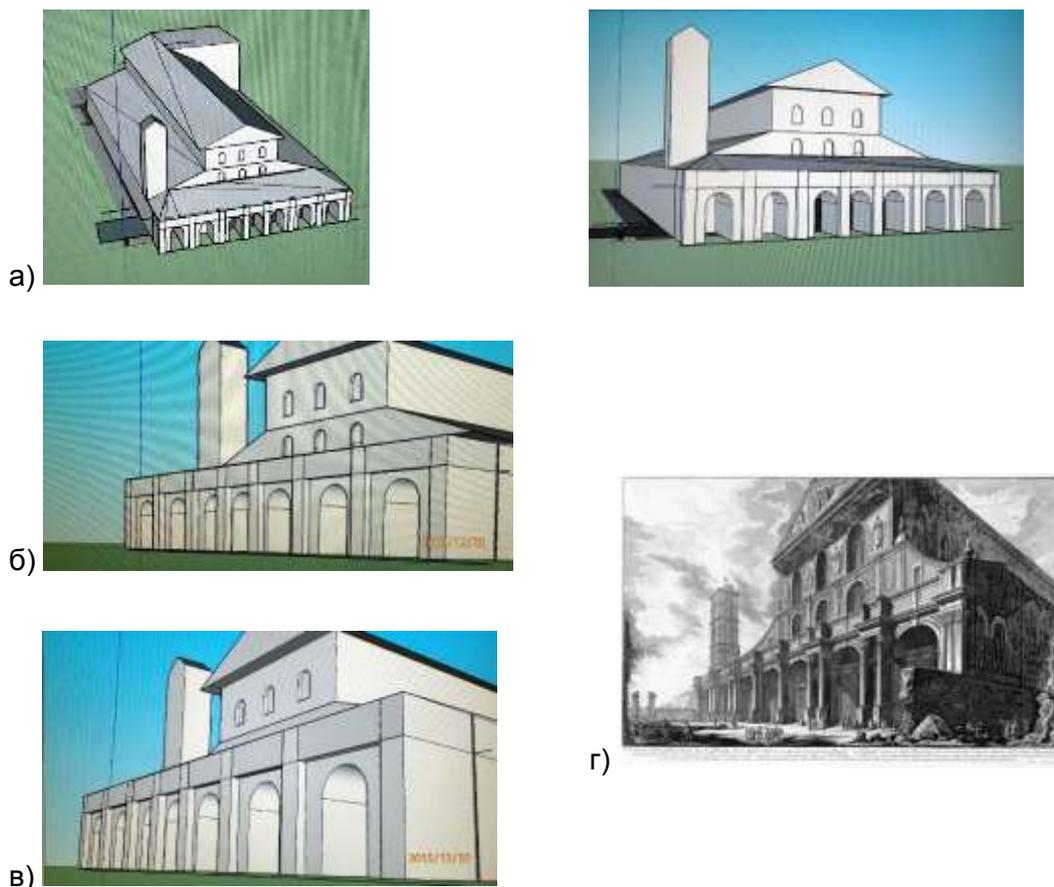


Рис. 14. Сравнительный анализ перспективного вида архитектурной формы в графической и компьютерной моделях:

- а) компьютерная модель базилики Сан Паоло фуори ле Мура (сделанная в программе SketchUp);
- б) компьютерная модель с удаленной точки зрения на базилику;
- в) сравнение перспективного вида компьютерной модели (с близкой точки зрения на базилику) с графической моделью, относительно одного уровня горизонта

На рисунках, 12, 13 и 14 представлен анализ перспективного вида базилики сравнения его с моделью выполненной в системе перспективы ( начертательной геометрии), далее с фотографиями макета, и компьютерной моделью

Обобщая выше сказанное можно заключить, чертеж (ортогональные проекции) для Пиранези выступали носителем объективной информации о изображаемой архитектуре. Визуальная перспектива на плоскости трансформировалась архитектором с учетом данных чертежа или натурного исследования пропорций изображаемой формы. Он стремился передать целостный образ, соединяющий как художественное, творческое начало так и метрическую точность, архитектурной графики, в связи с тем. Пиранези, опирался главным образом не на визуальную информацию получаемую глазом с фиксированной точки зрения, а на свои объемно-пространственные представления, сформированные в процессе длительного исследования природы, и образцов графики других мастеров.

В связи с тем, что чертеж — коммуникативный способ фиксации информации на плоскости о исследуемом объекте методом ее разложения на части (ортогональные проекции). Эта система уязвима потерей наглядной целостности разрыва проекционных связей между ортогональными видами. На протяжении истории существовали попытки увеличения цельности связывания разрозненной информации, например соединение в одной проекции два и более вида как на чертеже XVII века (см. Рис. 15) (Мильчик, 2008) и у Дж.-Бат. Пиранези (см. Таблицу 1, 3) плане купола Пантеона.

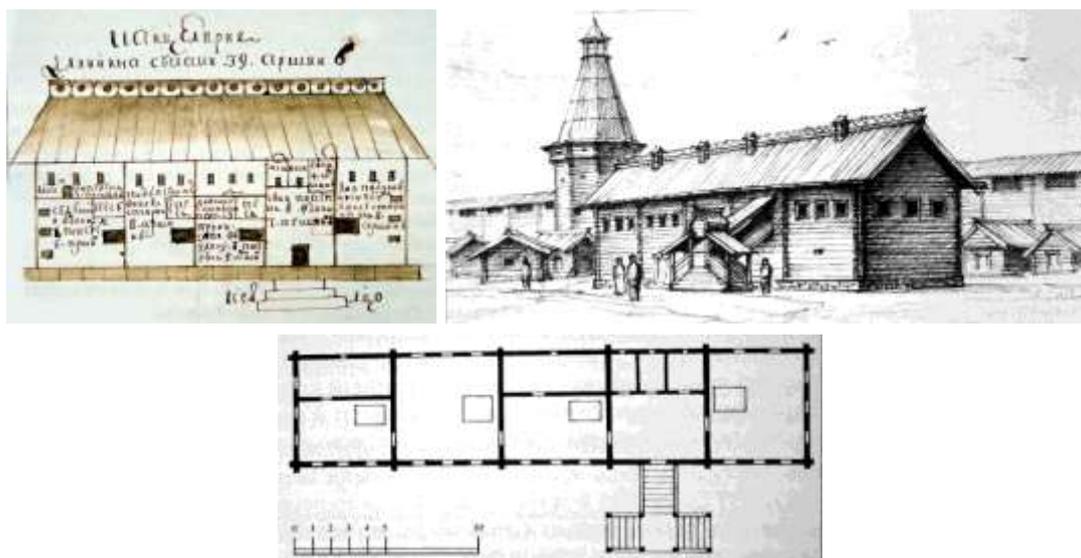


Рис. 15. Прием объединения визуальной и конструктивной информации о архитектурном объекте в одном изображении, на примере проектного чертежа Приказной палаты (канцелярии): а) чертеж, 1751 год., РГАДА; б) графическая реконструкция приказной палаты (М.И. Мильчик и А.Б. Бодэ); в) реконструкция плана Приказной палаты (М.И. Мильчик и А.Б. Бодэ).

Система линейной перспективы изображения предметного мира на плоскости в соответствии со зрительным восприятием предметов человеком одномерна. Она жестко обусловлена положением точки восприятия и кажущимися наблюдаемыми в натуре визуальными сокращениями размеров и очертаний формы. По мнению исследователя В.М. Розина «Художник стремился передать предмет, рассматриваемый с разных сторон или в разные моменты времени», «изображение предмета (его общий вид) составляется, суммируется из изображений отдельных «проекций» (целостных видов), полученных при рассматривании предмета с разных точек зрения (с разных сторон). При этом, однако, должна быть достигнута целостность предметного видения, т.е. предмет на изображении должен смотреться целым, а не составленным из частей (хотя с точки зрения современной визуальной установки то часто так и есть). Целостность предметного видения в разных культурах и на разных этапах культурного развития достигалась различными путями (Розин, 2009 с. 97).

Пиранези, использовал перспективу как средство формальной композиции на плоскости для объединения ее геометрической (состоящей из центров, осей, групп, узлов) и пластической структуры (активизирующей кинестетическое чувство движения на плоскости «пластический рельеф»). Его система перспективы многомерна, так как стремится показать время — информацию о форме с одной фиксированной точки и в процессе движения вокруг нее. Композиция гравюры соединяет выделенные художником элементы, несущие: визуальные, геометрические (ортогональные) и пространственные характеристики изображаемого ансамбля.

Рассматривая гравюры с видами базилики Сан-Паоло и Св. Петра в Риме, мы можем утверждать, что в его представлении сложился образ пространства, который он, передавал известными ему приемами. Используя ортогональные чертежи как модель. «Условность технического черчения порождает модель или схему предмета» (Розин, 2009 с. 102) Сравнивая пропорции изображаемой архитектуры на гравюре с размерами в плане и на фасаде, мы сможем наглядно увидеть важные для него геометрические характеристики изображаемой формы; понять выбор элементов композиции архитектуры несущих, образ формы и пространства. Сравнение перспективного вида на гравюре с трехмерной моделью и широкоугольной фотографией, сможем оценить степень «целостности предметного

видения» и коммуникативную точность моделирования представлений об изображаемой архитектурной форме и пространстве.

Перспективные связи между ее элементами в композиции гравюры базилики Сан-Паоло разорваны, элементы несущие характерную информацию о объемно-пространственной композиции с учетом зрительного восприятия формы в процессе движения (определения главной и дополнительных точек обзора) изображаемой формы подчеркивают архитектурную пластику стены и композицию существующей формы в пространстве. Путем соединения двух точек восприятия изображаемого предмета (фас и с боку). В формальной композиции на плоскости с учетом ее границ активизированы две пластические оси — вертикальная (в центральной части базилики) и диагональная (перспективный ракурс).

Его прием архитектурной графики чертежа составлял единое целое с его гравюрами — художественными изображениями, так как они раскрывали скрытые композиционные связи изображаемой архитектуры и пространства.

## Выводы

Обобщая наше исследование, мы пришли к следующему заключению — Дж. Б. Пиранези своим творчеством развил и подытожил накопленный ранее опыт своих предшественников, использовавших перспективу как изобразительное средство композиции на плоскости, необходимое для формирования как архитектурного (объемно-пространственного) и художественного образа. Исследование выявило общее для работ Пиранези и рассматриваемых в статье мастеров его эпохи отношение к перспективе не как статичной системе (например, перспективы в начертательной геометрии и компьютерной графике), а гибкой системе, позволяющей воссоздавать в представлении зрителя визуальный образ, модель, несущую геометрические и объемно-пространственные характеристики архитектурной композиции изображаемого на плоскости.

## Результаты

Результаты исследования можно использовать как дополнительный материал для учебно-методических пособий по дисциплине «Рисунок» и «Композиция» ориентированных на раскрытие особенности композиционного мышления архитектора.

## Литература

- Aitken RJ (1995) "Piranesi-Vico: "Il Campo Marzio". Foundations and the Eternal City (Giambattista Piranesi, Italy). M. Arch. Thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Kim Jung-Rak (2013) A Study on the archaeological landscape-painting of the 18th century: Focusing on the Capriccio of Giovanni Paolo Pannini. *The Journal of Art Theory & Practice*, 16: 175–199.
- Marchesano L (2010) *Invenzioni capric di carceri: The Prisons of Giovanni Battista Piranesi (1720-1778)*. *Getty research journal*, 2: 151–160.
- Marcos CL (2014) Imaginary Prisons or space as a topic. *Disegnare idee immagini — ideas images*, 25(48): 44–55.
- Minor HH (2010) Designing Piranesi. *Eighteenth-century life*, 34(3): 36–40.
- Stoppani T (2009) Piranesi. The print collection of Ghent University. *Journal of architecture*, 14: 646–654.
- Stoppani T (2014) Material lines: apocalypse, capricci, war and other disasters. *Journal of Architecture*, 19: 511–535
- Pizzo A (2011) "The gallows are scaffolding". Giovanni Battista Piranesi and building techniques in Roman times. *Archivo espanol de Arqueologia*, 84: 267–283.
- Бунин А (1935) Архитектура городских ансамблей "Ренессанс": Акад. коммун. хоз-ва. Изд-во Всес. акад. архитектуры, Москва, СССР.
- Жегин Л (1970) Язык живописного произведения: Условность древнего искусства. Искусство, Москва, СССР.

- Зимин А (2012) Рим: путешествие в Вечный город. НП-Принт, Санкт-Петербург, РФ.
- Локтев В (2004) Барокко от Микеланджело до Гварини (проблема стиля). Учеб. пособие по специальностям "Архитектура" и "Реконструкция и Реставрация". Архитектура-С, Москва, РФ.
- Маточкин Е (2006) Образ Преподобного Сергия Радонежского в русском искусстве. Издательский дом «Агни», Самара, РФ.
- Мельников В (2007) Мыслить рисунком. Нефтегазовое дело, Уфа, РФ.
- Мильчик М (2008) Каргополь. Деревянная крепость и остроги по реке Онеге. Лики России, Санкт-Петербург, РФ.
- Нейфах Л (2009) Невидимые линии. Опыт графического анализа произведений визуального искусства. Изд. Политех. Ун-та, Санкт-Петербург, РФ.
- Палладио А (1936) Четыре книги об архитектуре Андреа Палладио, в коих после краткого трактата о пяти ордерах и наставлений наиболее необходимых для строительства трактуется о частных домах, дорогах, мостах, площадях, ксисах и храмах. В 2 т. Изд-во Всес. акад. архитектуры, Москва, СССР.
- Ревзин Г. (2013) Русская архитектура рубежа XX–XXI в.в., Новое издательство, Москва, РФ.
- Розин В (2009) Визуальная культура и восприятие. Как человек видит и понимает мир. Изд. 4-е, доп. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», Москва, РФ.
- Рынин Н (1918) Перспектива. Типография Георгиевского Комитета, Петроград, РСФСР.
- Соняк ВМ (1985) Методические разработки по пленэрной практике. САИ, Свердловск, СССР.
- Сорокина Н (2013) Джованни Баттиста Пиранези. ООО «БуксМАрт», Москва, РФ.
- Сорокина НИ (2007b) Творчество Дж.-Б. Пиранези в контексте эпохи Просвещения. Дис.канд. искусств. Наук: 17.00.04. Москва, РФ.
- Сорокина НИ (2007a) Творчество Дж.-Б. Пиранези в контексте эпохи. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, 13(36): 127–139.
- Торопов СА (1939) Джованни Баттиста Пиранези: Избранные офорты. Всесоюзная Академия архитектуры, Москва, РФ.
- Успенский ВМ (2012) Венецианские влияния в видах Рима Дж. Б. Пиранези. *Дом Бурганова. Пространство культуры*, 1: 9–13.

## ПРОГНОЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗДАНИЙ

Тамара Александровна Дацюк

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительной физики и химии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: [tdatsuk@mail.ru](mailto:tdatsuk@mail.ru)

### Аннотация

При проектировании зданий необходим комплексный прогноз, направленный на обеспечение в зданиях экологически безопасной среды обитания при минимальном энергопотреблении. Для повышения эффективности проектных решений внутренняя среда здания и окружающая его атмосфера должны рассматриваться как единая динамическая система (ЕДС). Для прогноза качества среды обитания при проектировании зданий используется комплексный подход: экспериментальные исследования и численное моделирование. В статье приведены примеры формирования экологически безопасной среды обитания методом CFD.

### Ключевые слова

экологическая безопасность, математическое моделирование, проектирование зданий

В последнее время в России намечена тенденция на реализацию «зеленого строительства», что в свою очередь, требует не только более высокого качества проектирования и строительства зданий, но и надежных методик оценки экологической ситуации при проектировании зданий, особенно в крупных городах. Использование при проектировании только нормативных документов, к сожалению, не гарантирует, что при эксплуатации в зданиях будет обеспечена экологически безопасная и комфортная среда. Технология проектирования жилых зданий и промышленных предприятий на базе математического моделирования при совместном решении задач строительной физики, отопления, вентиляции, энергосбережения и охраны окружающей среды позволит определить оптимальную эксплуатационную характеристику зданий различного назначения в течение их жизненного цикла при максимальном использовании энергии окружающей среды.

Под экологической безопасностью проектируемых зданий понимается совокупность требований для комплексной оценки проектных решений, которые при строительстве и эксплуатации объекта обеспечат комфортную среду обитания при минимальном потреблении топливно-энергетических ресурсов и минимальных объемах твердых и жидких отходов. Требования экологической безопасности, предъявляемые к жилым зданиям в целом, их размещению на территориях поселений, к строительным конструкциям и инженерным системам, приняты в соответствии с современными нормативными документами (СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011; РМД 23-16-2012).

Для оценки экологической безопасности жилых зданий предложен комплексный показатель экологической безопасности (КПЭБ), по численному значению которого (по аналогии с классами энергетической эффективности) устанавливается класс экологической безопасности жилых зданий. Методика определения (КПЭБ) основана на

рейтинговой системе, используя в качестве исходных величин 54 показателя экологической безопасности (ПЭБ), каждый из которых вносит свой вклад в оценку КПЭБ (Дацюк, Смирнов, Пинкевич, 2013). Качественные и количественные ПЭБ сгруппированы в 6 кластеров, которые характеризуют различные аспекты среды обитания. Для каждого кластера определяется верхняя и нижняя граница диапазона значимости входящих в него ПЭБ. Для оценки экологической безопасности жилых зданий в разработанной методике принят метод расстановки приоритетов.

Достоверность оценки экологической безопасности жилых зданий, в свою очередь, зависит от того, насколько надежно определяются исходные значения ПЭБ. Для прогноза качества среды обитания можно выделить комплекс основных ПЭБ, количественные значения которых при проектировании объектов должны быть надежно определены. Внутренняя среда здания и окружающая его атмосфера должны рассматриваться как единая динамическая система (ЕДС), которая характеризуется комплексом ПЭБ. Оболочка здания в пределах, которой происходят сложные процессы тепломассообмена, разделяет ее на подсистемы: внутреннюю и внешнюю. Особенности процессов тепломассообмена в ЕДС учитываются как динамические связи (Дацюк, 2009).

Комплекс основных ПЭБ включает:

для внешней подсистемы — скорость ветра, динамическое давление и концентрации вредных веществ у фасадов зданий, температура и влажность наружного воздуха, поток солнечной радиации;

для внутренней подсистемы — температура, влажность и подвижность воздуха, допустимые концентрации вредных веществ, коэффициент естественного освещения (КЕО), продолжительность солнечной инсоляции, кратность воздухообмена;

для ограждающих конструкций здания — трансмиссионный и инфильтрационный коэффициенты теплопередачи, паропроницаемость, воздухопроницаемость и звукоизоляция ограждающих конструкций, характеристики приточных устройств.

Качество внутренней среды зданий в период эксплуатации будет зависеть от того, как тщательно на стадии проектирования исследованы процессы, происходящие в ЕДС и определены количественные значения основных ПЭБ, а также особенности их пространственного распределения.

Для выбора эффективных проектных вариантов и оценки экологически безопасной среды для проектируемых зданий в СПБАСУ используется комплексный подход, который включает экспериментальную оценку теплофизических характеристик новых теплоизоляционных материалов и ограждающих конструкций, светопрозрачных конструкций, характеристик приточных устройств, компьютерное моделирование аэродинамического режима застройки, загрязнения воздуха выбросами автотранспорта и других источников в пределах застройки, процессов тепломассообмена в ограждающих конструкциях и микроклимата проектируемых зданий. Разработанный подход эффективен также при проектировании промпредприятий и был реализован, например, при проектировании Богучанского и Тайшетского алюминиевых заводов. Компьютерное моделирование проводится с использованием программных продуктов «ANSYS» и «STAR-CD» (Гримитлин, Дацюк, Денисихина, 2013). Для расчета загрязнения атмосферы низкими выбросами используется программа (Дацюк, 2000). Ниже приведены примеры реализации предложенного подхода.

На первом этапе анализируются процессы, происходящие во внешней подсистеме и определяются значения и особенности распределения в зоне расположения здания ПЭБ (динамического давления и концентраций вредных веществ у фасадов здания). На рис. 1 приведен пример обтекания здания ветровым потоком и образование зоны ветровой тени при направлении ветра нормально продольной оси здания, полученный при компьютерном моделировании внешней подсистемы.

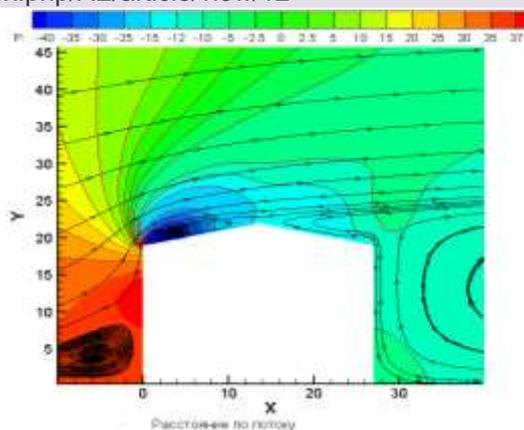


Рисунок 1. Поле давления и линии тока при обтекании здания ветровым потоком

Распределение давления у фасадов здания и в местах расположения вентиляционных шахт необходимо знать для надежной работы системы естественной вентиляции. Если для преобладающего направления ветра вентиляционная шахта окажется расположенной в зоне повышенного динамического давления, то весьма вероятно, «опрокидывание» вентиляции.

Общеизвестно, что одним из основных загрязнителей воздуха городов является автотранспорт. Интенсивное движение, подземные гаражи, стоянки машин, расположенные в жилых зданиях или вблизи них, а также выбросы промпредприятий приводят к загрязнению воздуха. Характер загрязнения городской среды низкими источниками связан со сложной структурой воздушных потоков и расположением городских магистралей (Русакова, 2015). В зонах ветровой тени (циркуляционных зонах), которые локализуются вблизи зданий, концентрации вредных веществ от выбросов автотранспорта часто превышают допустимые значения. Поступление загрязненного воздуха в жилые здания приводит к развитию хронических заболеваний дыхательных путей астмы, бронхита и заболеваний нервной системы. Например, при анализе воздушной среде библиотек были обнаружены вещества, которые могли быть занесены в здания только из окружающей атмосферы (Кобякова, 1998).

На втором этапе — анализируются процессы тепломассопереноса в ограждающих конструкциях и определяются количественные значения ПЭБ, которые используются при определении класса энергоэффективности зданий. Некорректная оценка трансмиссионного и инфильтрационного коэффициентов теплопередачи здания приводит к заниженным значениям удельного энергопотребления. Нередко встречается ситуация, когда здание по проекту соответствует классу «А», однако, при сдаче объекта в эксплуатацию (по результатам натурных измерений) удельное энергопотребление соответствует только классу «С». К сожалению, это связано не только с качеством строительства, но и с неточностями расчета.

Для выполнения требований по энергосбережению в ограждающих конструкциях современных зданий используются разного типа утеплители и конструктивные элементы. Достоверное значение трансмиссионного коэффициента теплопередачи наружных стен и перекрытий зависит от величины коэффициента теплотехнической однородности, для определения которого необходимо проведение испытаний на характерных фрагментах конструкций в климатической камере и компьютерный расчет температурных полей. Значения приведенных сопротивлений теплопередаче, рассчитанные на основе инженерных методик, к сожалению, не подтверждаются лабораторным экспериментом.

В качестве примера можно привести результаты испытаний конструкции ж/б панели с утеплителем и гибкими связями фирмы «Рейкко», полученные при проведении комплексного исследования, которое включало испытания в климатической камере и компьютерное моделирование распределения температуры в панели, приведенные на рис. 2. Экспериментальное значение коэффициента теплотехнической однородности панели — 0.82, а приведенное значение сопротивления теплопередаче тела панели

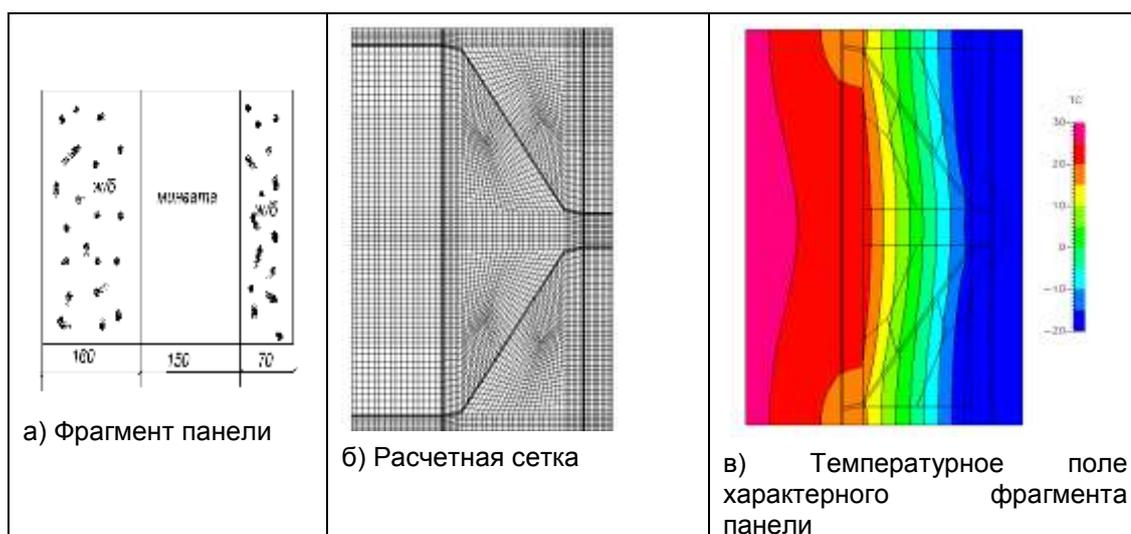


Рисунок 2. Примеры расчета температурного поля фрагмента панели

При испытаниях в климатической камере фрагмента панели с термопрофилем, которые достаточно широко используются в строительной практике, выявлена зависимость термического сопротивления конструкции от времени испытаний. В течение 3 суток термическое сопротивление снизилось на 10%. Значение коэффициента теплотехнической однородности по результатам испытаний — 0.65.

Более сложно корректно определить инфильтрационный коэффициент теплопередачи здания. Инфильтрационный воздух поступает в основном через неплотности светопрозрачных конструкций. Обобщение результатов испытаний оконных блоков на воздухопроницаемость, выполненных в ИЦ СПбГАСУ за 10 лет, показало, что через оконные блоки, которые наиболее часто используются при строительстве типовых зданий, в помещение при 10 Па поступает менее 5 кг/(ч м<sup>2</sup>) наружного воздуха, что соответствует нормативным требованиям по воздухопроницаемости оконных конструкций из ПВХ профиля, однако, недостаточно для обеспечения нормативной кратности воздухообмена. Установка специальных приточных устройств и их выбор должны проводиться по результатам комплексных сертификационных испытаний.

Вентиляционные устройства: стеновые или оконные клапаны, или специальная фурнитура (например, фирмы «Winkhaus» система «ActivPilot» с функцией параллельного смещения створки PAD, PADK, PADM) должны удовлетворять следующим требованиям:

- количество поступающего воздуха должно обеспечивать требуемый воздухообмен;
- звукоизоляция светопрозрачной конструкции с клапаном должна обеспечивать допустимые значения уровня звукового давления в жилых помещениях, особенно в ночное время;
- температура на поверхностях клапана должна быть выше точки росы, чтобы избежать образования конденсата;
- распределение холодного воздуха в помещении при открытом приточном устройстве должно обеспечивать достаточную степень перемешивания, исключая резкое изменение градиента температуры.

На третьем этапе проводится анализ качества внутреннего воздуха на основе пространственной взаимосвязи динамических процессов, происходящих внутри помещений и в окружающей здания атмосфере (Datsuk, Ivlev, Pukhkal 2014). Оценивается количество воздуха и вредных веществ, поступающих в помещения. На примере одно-двухкомнатных квартир проводилось моделирование тепло-влажностного режима с

использованием гидродинамического пакета «STAR-CCM+». Решалась нестационарная задача, температурное поле в наружных стенах формировалось в результате расчета. При расчетах учитывалось ветровое давление, температура наружного воздуха, теплотехнические характеристики ограждающих конструкций. Сопротивление теплопередаче наружной стены  $R_1 = 3.1 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  и оконного блока  $R_2 = 0.56 \text{ м}^2 \text{ К/Вт}$  принималось в соответствии с нормативными требованиями для Санкт-Петербурга.

Моделирование проводилось для зимнего режима. Температура наружного воздуха — минус  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура внутреннего воздуха — плюс  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Отопительный прибор, конвектор, моделировался в виде прямоугольного блока, на верхней грани которого задавался расчетный тепловой поток для компенсации теплопотерь и нагрева приточного воздуха. Количество удаляемого из квартиры воздуха  $110 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  из санблока и  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  из кухни. Сечения приточных устройств были выбраны таким образом, чтобы в помещении обеспечивался однократный воздухообмен.

Как пример, на рис. 3 приведены поля скорости и температуры при проветривании однокомнатной квартиры через оконный блок с фурнитурой системы «ActivPilot» с функцией параллельного смещения оконной створки, расположенный в комнате. Анализ распределения ПЭБ показал, что области повышенной температуры локализованы в местах расположения вытяжных отверстий. При установке конвекторов холодный воздух, поступающий через щели, быстро нагревается. Застойная зона расположена в верхней части коридора.

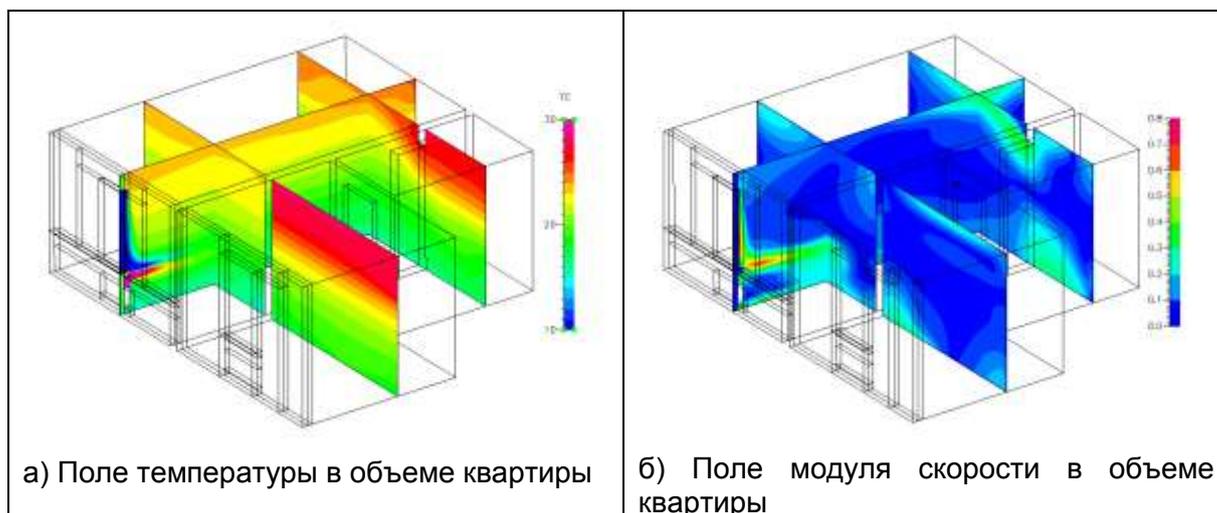


Рисунок 3. Результаты компьютерного моделирования распределения ПЭБ (температура и подвижность воздуха) в однокомнатной квартире

В заключении следует отметить, что предложенный комплексный подход для оценки количественных величин основных ПЭБ позволяет прогнозировать экологическую ситуацию при проектировании зданий.

## Литература

Datsuk T, Ivlev U, Pukhkal V (2014) Forecasting of microclimate in the course of buildings design and reconstruction. *Advanced Materials Research*, 1020: 643–648.

Гримитлин АМ, Дацюк ТА, Денисихина ДМ (2013) Математическое моделирование в проектировании вентиляции и кондиционирования. АВОК, СПб, РФ.

Дацюк ТА (2000) Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов. СПбГАСУ, СПб, РФ. Русакова ТИ (2015) Исследование загрязнения атмосферного воздуха

выбросами автотранспорта в «уличных каньонах» города. *Наука и прогресс транспорта, Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, 1(55): 23–31.

Кобякова ВИ, Успенская СВ (1998) Воздушная среда библиотек, архивов, музеев. Сб. докл. междун. конф. «Воздух-98». СПб, РФ сс. 100–102.

НОСТРОЙ (Национальное объединение строителей) (2011) СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011: «Зеленое строительство» Здания жилые и общественные. Рейтинговая система оценки устойчивости среды обитания. НОСТРОЙ, Москва, РФ.

Правительство Санкт-Петербурга (2013) РМД 23-16-2012: Рекомендации по обеспечению энергетической эффективности жилых и общественных зданий. Правительство Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, РФ.

Дацюк ТА, Смирнов ЕБ, Пинкевич ИК (2013) Методика комплексной оценки экологической безопасности проектируемых зданий. *Вестник гражданских инженеров*, 5(40): 219–226.

Дацюк ТА (2009) Инженерные аспекты энергосбережения зданий. *Труды РААСН*, №5: 326–329.

## **ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИЗМА РЕКОНСТРУКЦИИ ДТП ПО ПАРАМЕТРАМ ПРОЦЕССА ТОРМОЖЕНИЯ ДВУХКОЛЕСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Станислав Сергеевич Евтюков<sup>1</sup>, Григорий Гинзбург<sup>2</sup>, Илья Сергеевич Брылев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры наземных транспортных технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: ese-89@yandex.ru

<sup>2</sup> Президент Vigrig Inc, действительный член Международной академии по безопасности дорожного движения и экспертиз, DBA

<sup>3</sup> Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры наземных транспортных технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: ilya2104@mail.ru

### **Аннотация**

Почти во всех странах мира в дорожном движении наблюдается рост числа двухколесных механических транспортных средств (ДМТС, мотоциклов, ТС категории L<sub>3</sub>). В связи с этим возросло число жертв и тяжело раненных в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Установление фактических причин, приведших к аварии, и обстоятельств им способствующих, является одной из важных задач обеспечения безопасности движения.

За последние десятилетия, с одной стороны, конструкции двухколесных механических транспортных средств значительно усовершенствованы, поэтому требуется приведение в соответствии с ними аналитического аппарата оценки параметров процесса их торможения. С другой стороны, в действующей экспертной практике анализа ДТП при проведении расчетов продолжают использоваться оценки времени нарастания замедления и установившегося замедления для мотоциклов отечественного производства прошлых лет, которые на сегодняшний день по возрасту практически не участвуют в дорожном движении. Оба этих обстоятельства требуют переработки, уточнения и формирования обновленной расчетной базы оценки процессов торможения ДМТС с целью повышения достоверности такой оценки при проведении экспертизы ДТП — для задач установления соответствия либо несоответствия действий водителей требованиям правил дорожного движения (ПДД), обоснования причин возникновения аварийных ситуаций, оценки наличия либо отсутствия технической возможности у водителя ДМТС предотвратить ДТП.

### **Ключевые слова**

автотехническая экспертиза, двухколесные транспортные средства, расчет скорости движения, замедление

### **Введение**

Существующие недостатки общепринятой методики расчета скорости движения двухколесных механических транспортных средств ДМТС при торможении, созданной в 60-х годах прошлого века и применяемой до сих пор в Российской Федерации состоят в том, что предусматривается расчет скорости движения ДМТС по следам торможения, в результате имеет место «занижение» оценки расчетной скорости движения.

Экспертная практика показывает, что фактическая скорость движения ДМТС к моменту начала торможения, оказывается выше расчетной, т.к. эксперты уже заведомо

используют заниженные, осредненные значения установившегося замедления и времени его нарастания до установившегося значения замедления.

В существующей методике расчёта скорости движения, тормозного и остановочного пути, времени торможения, удаления от места столкновения в момент возникновения опасности для движения не учитывается так же влияние на получаемые оценки установившегося замедления ДМТС и времени его нарастания наличие антиблокировочной системы (АБС), типа тормозной системы мотоцикла и переменной степени его нагрузки.

Опыт экспертной деятельности позволяет утверждать, что в вышеприведенном контексте, методика оценки параметров процесса торможения при реконструкции ДТП, учитывающая вышеперечисленные особенности конструкции ДМТС и режимы движения в процессе торможения, при ее максимальной адаптации к исследуемому ДТП в целом, дает возможность приведения ее в соответствие с уровнем современного технического оснащения ДМТС, способным существенно повысить точность получения оценок параметров процесса торможения и объективность этих оценок. (Брылев, 2014, 2015, Евтюков, Брылев 2015; Евтюков, Брылев 2013а, 2015; Guo et al., 2008; Obenski Kenneth, 1994).

#### Предмет, задачи и методы исследования

В ходе проведения экспериментов на торможение ДМТС, а так же анализируя результаты экспериментов, авторами установлено, что в большей степени на величину времени нарастания замедления и установившегося замедления оказывают влияние следующие факторы, такие как: наличие/отсутствие АБС, тип торможения (ручным, ножным приводом, либо одновременное воздействие на каждый из них), степень нагрузки ДМТС, состояние дорожного покрытия, тип тормозной системы.

С использованием программного обеспечения деселерометра модели LWS-2МС, наиболее наглядная диаграмма процесса торможения мотоцикла марки Yamaha XVS 1100 Drag Star Classic на сухом асфальте с коэффициентом сцепления около 0,8 при комбинированном торможении и снаряженной массе отражена на рис 1.



Рис. 1. Тормозная диаграмма на примере мотоцикла марки Yamaha XVS 1100 Drag Star Classic при комбинированном типе торможения, коэффициент сцепления около 0,8, снаряженная масса

## Обсуждение

При анализе значений установившегося замедления ТС категории  $L_3$ , времени его нарастания, являющихся основными характеристиками торможения мотоциклов, и от значения которых зависит итог реконструкции механизма ДТП (т.е. расчетная оценка наличия либо отсутствия у водителя мотоцикла технической возможности предотвратить дорожно-транспортное происшествие), можно отметить, что экспертные организации располагают информацией о значениях замедления мотоциклов, полученных ВНИИСЭ СССР более 35 лет назад (Арабулин, 1990; Брылев, 2014, 2015; Евтюков, Брылев, 2013а, 2014, 2015; 2016; Креницын, 1987).

На значение установившегося замедления ( $j$ ) и на время нарастания замедления до установившегося ( $t_3$ ) влияет множество факторов, таких как техническое состояние ДМТС (исправность тормозной системы, состояние шин, наличие АБС либо вспомогательных систем торможения и т.д.), состояние дорожного покрытия (наличие колеи, неровностей, температура и вид дорожного полотна и т.д.).

Проведенный анализ недостатков действующей методики расчетной оценки таких основных параметров процесса торможения как: остановочный путь ДМТС ( $S_0$ ), скорость движения перед торможением ( $V_a$ ), удаление ДМТС от места столкновения ( $S_y$ ), остановочное время ( $T_0$ ), допустимая скорость движения по условию видимости ( $V_{дв}$ ), традиционно применяемых при реконструкции ДТП позволил установить, что при выборе нормативных значений установившегося замедления и времени его нарастания не учитывается тип тормозной системы ДМТС, промежуточная степень нагрузки мотоцикла, наличие АБС, влияющих на формирование значений параметров процесса торможения (Брылев, 2014; Евтюков, Брылев, 2013а, 2014, 2015).

## Результаты

Результаты сравнительной оценки соответствия требованиям дня значений установившегося замедления и времени его нарастания, одобренных и рекомендованных Научно-методическим советом по судебной автотехнической экспертизе при ВНИИСЭ МЮ СССР и введенных в действие с 01.01.1991, а так же установленных ГОСТ 41.78-2001 — и значений, полученных в экспериментальных исследованиях установлено, что величина времени нарастания замедления и установившегося замедления ДМТС значительно занижена (Брылев, 2015; Евтюков, Брылев, 2014, 2015). Это связано с тем, что применяемые нормативные значения были установлены без учета значительных изменений конструкции ДМТС, их надежности и других функциональных свойств. В российской экспертной практике эти новые качества конструкций ДМТС не нашли своего отражения в расчетных зависимостях, рекомендуемых к применению при расследовании и реконструкции механизма ДТП при определении остановочного пути, удаления ДМТС от места столкновения, расчета скорости движения в момент начала торможения, остановочного времени, допустимой скорости движения по условию видимости.

В ходе проведения экспериментальных исследований, проведена оценка влияния указанных выше факторов на формирование значения установившегося замедления ( $j$ ) и времени его нарастания до установившегося значения замедления ( $t_3$ ), обоснована необходимость учета в расчетных зависимостях наличия либо отсутствия АБС, типа тормозной системы, переменной степени нагрузки ДМТС, режима торможения, в зависимости от состояния дорожного покрытия на момент возникновения ДТП. В этой связи, при выборе значения установившегося замедления и времени его нарастания показана целесообразность введения экспериментальных коэффициентов  $K_j$  и  $K_{t_3}$ , корректирующих величину установившегося замедления и времени его нарастания с учетом режима торможения, типа тормозной системы ДМТС, состояния и типа дорожного покрытия, наличия АБС и переменной степени нагрузки ДМТС. Расчетные зависимости для вычисления параметров процессов торможения при реконструкции механизма ДТП, с учетом указанных факторов примут вид (Брылев, 2014, 2015; Евтюков, Брылев, 2013а, 2014, 2015):

— остановочный путь ДМТС, м:

$$S_o = (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3 \cdot K_i) \frac{V_a}{3,6} + \frac{V_a^2}{26,0 \cdot j \cdot K_j}; \quad (1)$$

— скорость ДМТС в начале торможения при наличии зафиксированных следов торможения, км/ч:

$$V_a = 1,8 \cdot t_3 \cdot K_i \cdot j \cdot K_j + 3,6 \cdot \sqrt{2,0 \cdot j \cdot K_j \cdot S_{ю}}; \quad (2)$$

— удаление ДМТС от места столкновения, м:

$$S_y = (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3 \cdot K_i) \cdot \frac{V_a}{3,6} + S_t; \quad (3)$$

— остановочное время ДМТС, с:

$$T_o = (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3 \cdot K_i) + \frac{V_a}{3,6 \cdot j \cdot K_j}; \quad (4)$$

— допустимая скорость движения ДМТС по условиям видимости, км/ч:

$$V_{дв} = 3,6 \cdot \sqrt{(j \cdot K_j \cdot (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3 \cdot K_i))^2 + 2 \cdot j \cdot K_j \cdot S_b} - 3,6 \cdot j \cdot K_j \cdot (t_1 + t_2 + 0,5 \cdot t_3 \cdot K_i), \quad (5)$$

где  $K_j$  — коэффициент, корректирующий величину замедления ДМТС;  $K_i$  — коэффициент, корректирующий величину времени нарастания замедления ДМТС до установившегося;  $t_1$  — время реакции водителя, с;  $t_2$  — время срабатывания тормозного привода, с;  $t_3$  — время нарастания замедления до установившегося, с;  $j$  — установившееся замедление м/с<sup>2</sup>;  $S_t$  — тормозной след ДМТС от его начала до места столкновения, м;  $V_a$  — скорость движения в момент принятия решения о торможении;  $S_{ю}$  — следы торможения, м;  $S_b$  — видимость с места водителя.

Анализируя результаты экспериментальных исследований установившегося замедления ( $j$ ) и времени его нарастания ( $t_3$ ) установлено, что их фактическая величина у большинства современных ДМТС значительно выше нормативных значений, рекомендуемых к использованию при проведении автотехнических исследований. При расчете технической возможности у водителя ДМТС предотвратить ДТП, целесообразно использовать не нормативную величину установившегося замедления и времени его нарастания, а величину фактически установленную в ходе экспериментальных исследований.

Из экспертной практики известно, что в большинстве случаев не представляется возможным определить фактическое значение установившегося замедления и время его нарастания ( $y_{\phi j}$ ) и ( $y_{\phi i}$ ) на момент ДТП. В таких случаях, в рамках решения краевой задачи, рекомендуется нормативные, справочные значения замедления ( $y_{нj}$ ) и время его нарастания ( $y_{нi}$ ) сравнивать с рекомендуемыми ( $y_{pj}$ ) и ( $y_{pi}$ ). Если ( $y_{нj} \geq y_{pj}$ ), то измеряемый параметр не может повлиять на величину установившегося замедления либо время нарастания замедления, а если ( $y_{нj} < y_{pj}$ ), то измеряемый параметр оказывает влияние на величину установившегося замедления, либо на время его нарастания (Брылев, 2015; Евтюков, Брылев, 2015;).

При наличии возможности определения фактического значения установившегося замедления ТС категории  $L_3$  и времени его нарастания непосредственного после ДТП, коэффициент  $K_{ij}$  вычисляется по зависимости:

$$K_{i,j} = \frac{y_{\phi i,j}}{y_{n,i,j}} \quad (6)$$

В случае отсутствия возможности определения фактического значения установившегося замедления ТС категории  $L_3$  и времени его нарастания непосредственного после ДТП, коэффициент  $K_{i,j}$  вычисляется по зависимости:

$$K_{i,j} = \frac{y_{p i,j}}{y_{n,i,j}} \quad (7)$$

## Выводы

Таким образом, экспериментально определенные фактические значения установившегося замедления исследуемых ДМТС на дорожном покрытии с различными коэффициентами сцепления позволили установить факт их превышения по сравнению со справочными значениями в среднем на 20–25%; фактические значения времени нарастания замедления до установившегося значения выше имеющихся справочных значений в среднем в 2–3 раза.

Корректировка нормативных (осредненных) значений установившегося замедления и времени его нарастания, позволила уточнить методику реконструкции ДТП в зависимости от типа тормозной системы ДМТС, величины массы ДМТС, типа и состояния дорожного покрытия, наличия АБС и режима торможения.

## Литература

- Guo L, Jin XL, Zhang XY, Shen J, Chen YJ, Chen JG (2008) Study of injuries combining computer simulation in motorcycle–car collision accidents. *Forensic Science International*, 177(2–3): 90–96.
- Obenski Kenneth S (1994) *Motorcycle Accident Reconstruction: Understanding Motorcycles*. Lawyers & Judges Publishing Co.
- Арабули ЮГ (1990) Использование в экспертной практике экспериментально-расчетных значений параметров торможения мототранспортных средств: метод. Рекомендации. ВНИИСЭ, Москва, РФ.
- Брылев ИС (2014) Оценка погрешности расчетов скорости движения мотоциклов на стадии сближения. *Вестник гражданских инженеров*, 6(47): 178–182.
- Брылев ИС (2015) Экспериментальные исследования параметров замедления транспортных средств категории  $L_3$ . *Вестник гражданских инженеров*, 2(49): 131–137.
- Евтюков СА, Брылев ИС (2013а) Обзор существующих методик расчета скорости двухколесных транспортных средств. *Современные проблемы науки и образования*, 6; URL: [www.science-education.ru/113-10750](http://www.science-education.ru/113-10750) (дата обращения 21.06.2016)
- Евтюков СА, Брылев ИС (2013b) Проблемы проведения автотехнических экспертиз с участием мотоциклистов. *Фундаментальные и прикладные науки*, б/н. 125–129.
- Евтюков СА, Брылев ИС (2014) Экспериментальные исследования параметров установившегося замедления и тормозного пути транспортных средств категории  $L_3$ . *Мир транспорта и технологических машин*, 4(47): 125–130.
- Евтюков СА, Брылев ИС (2015) Алгоритм корректировки нормативных значений времени нарастания замедления, установившегося замедления двухколесных механических транспортных средств. *Мир транспорта и технологических машин*, 3(50): 3–12.
- Евтюков СС, Брылев ИС (2016) Расчетная оценка параметров процесса торможения транспортных средств категории  $L_3$  при реконструкции ДТП. *Вестник гражданских инженеров*, 2(55)
- Креницын АА (1987) Применение нормативных значений параметров торможения мототранспортных средств в экспертной практике: метод. рекомендации. ВНИИСЭ, Москва, РФ.
- Пучкин ВА (2010) Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: Базы данных. Экспертная техника. Методы решений. ИПО ЮФУ, Ростов н/д, РФ.

## **ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ВЫВОДА УРАВНЕНИЙ В СМЕШАННОЙ ФОРМЕ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ОБЩЕГО ВИДА**

Владимир Васильевич Карпов

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Прикладной математики и информатики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: [vvkarpov@lan.spbgasu.ru](mailto:vvkarpov@lan.spbgasu.ru)

### **Аннотация**

В данной работе при помощи вариационного метода осуществляется вывод уравнений в смешанной форме для пологих оболочечных конструкций произвольного вида. Такие уравнения являются более упрощенными уравнениями теории оболочек в сравнении с уравнениями в перемещениях, но при некоторых видах закрепления краев оболочки (например, при подвижно-шарнирном закреплении) они являются более удобными. Математическая модель деформирования оболочки строится на основе гипотез Кирхгофа – Лява, учитывается геометрическая нелинейность.

Для вывода уравнений равновесия и третьего уравнения совместности деформаций в срединной поверхности оболочки используется полный функционал энергии оболочки, из условия минимума которого (первая вариация функционала должна равняться нулю) получаются эти уравнения. Вводится функция напряжений в срединной поверхности оболочки таким образом, чтобы первые два уравнения равновесия тождественно обращались в ноль. Таким образом, третье уравнение равновесия и уравнение совместности деформаций дают уравнение в смешанной форме относительно функции прогиба и функции напряжения в срединной поверхности.

### **Ключевые слова**

оболочки, математическая модель, уравнения в смешанной форме, вариационный метод.

### **Введение**

Интенсивное развитие нелинейной теории оболочек начинается в 30–40 гг. прошлого столетия. Это прежде всего касается пологих оболочек (Х. М. Муштари (1939), L. N. Donell (1934), В. З. Власов (1949)).

В начале 60-х годов, с появлением ЭВМ, начинается исследование устойчивости оболочек с учетом геометрической нелинейности. Для пологих оболочек прямоугольного плана исследования проводились лишь преимущественно на основе уравнений в смешанной форме (В. З. Власов (1949), В. В. Петров (1975), В. А. Крысько (1976) и др.), которые до сих пор используются достаточно часто (Никитин, Ступишин и Ватанин, 2012; Коломоец и Модин, 2014; Спасская и Трещев, 2015; Shen и Yang, 2014; Zhang и van Campen, 2003; van Campen D, Bouwman, Zhang. и ter Weeme, 2002; Seffen, 2007; Карпов, 2010 и др.). В основном, рассматривались оболочки постоянной толщины, для которых уравнения в смешанной форме были получены В. З. Власовым.

Уравнения в смешанной форме выводятся только для пологих оболочек, тем не менее, они находят большое применение в строительстве, так как для таких уравнений легко подобрать аппроксимирующие функции при шарнирно-подвижном закреплении контура оболочки. Такая форма закрепления позволяет избежать концентрации напряжений вблизи контура оболочки, но для нее трудно подобрать аппроксимирующие функции при использовании уравнений в перемещениях.

В данной работе выводятся уравнения в смешанной форме для оболочек произвольного вида (но пологих). Для вывода этих уравнений используются третье уравнение равновесия и одно из уравнений совместности деформаций в срединной поверхности оболочки. Уравнения совместности деформаций для оболочек общего вида впервые были получены А. Л. Гольденвейзером (1940) путем составления условий Гаусса – Кодацци для деформированной срединной поверхности.

### Предмет, задачи и методы

Целью данной работы является вывод уравнений в смешанной форме для пологих оболочечных конструкций произвольного вида.

### Результаты исследования и обсуждение

Уравнения в смешанной форме являются более упрощенными уравнениями теории оболочек в сравнении с уравнениями в перемещениях, но при некоторых видах закрепления краев оболочки (например, при подвижно-шарнирном закреплении) они являются более удобными.

Теперь получим уравнения в смешанной форме, которые представляют собой систему двух дифференциальных уравнений относительно нормального перемещения  $W = W(x, y)$  и функции напряжений в срединной поверхности  $\Phi = \Phi(x, y)$ .

Пусть на оболочку действует нормальная статическая нагрузка  $q$ , распределенная по поверхности достаточно равномерно. Будем полагать, что оболочка является либо полой, либо разбивается в процессе деформирования на пологие участки. Срединная поверхность обшивки толщиной  $h$  принимается за координатную поверхность. Оси  $x$  и  $y$  ортогональной системы координат направлены по линиям главных кривизн оболочки, ось  $z$  — ортогонально координатной поверхности в сторону вогнутости

Введем функцию напряжений  $\Phi(x, y)$ , связанную с усилиями следующими зависимостями (Перцев и Платонов, 1987):

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{1}{A^2 B} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = F_1(\Phi), \\ N_y &= \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{AB^2} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = F_2(\Phi), \quad (1) \\ N_{xy} &= \frac{1}{AB} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \right) = F_3(\Phi). \end{aligned}$$

Один из приемов получения уравнений в смешанной форме состоит в следующем:

Если подставить (1) в первые два уравнения равновесия, то эти уравнения будут удовлетворяться тождественно. А третье уравнение равновесия

$$\begin{aligned} &AB(k_x N_x + k_y N_y) - \frac{\partial}{\partial x} B(N_x \theta_1 + N_{xy} \theta_2) - \frac{\partial}{\partial y} A(N_y \theta_2 + N_{xy} \theta_1) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B M_x}{\partial x} - M_y \frac{\partial B}{\partial x} + \frac{\partial A M_{xy}}{\partial y} + M_{xy} \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A M_y}{\partial y} - M_x \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial B M_{xy}}{\partial x} + M_{xy} \frac{\partial B}{\partial x} \right) \right] + ABq = 0 \end{aligned}$$

после замены усилий  $N_x, N_y, N_{xy}$  через функцию  $\Phi(x, y)$  по правилу (1) даст первое уравнение в смешанной форме. При этом моменты выражаются через функцию  $W(x, y)$  и

$$\theta_1 = -\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \theta_2 = -\frac{1}{B} \frac{\partial W}{\partial y}; \quad \text{здесь } A, B \text{ — параметры Ляме.}$$

Второе уравнение системы находится с помощью третьего уравнения совместности деформаций:

$$- AB(k_x\chi_2 + k_y\chi_1 - \chi_1\chi_2 + \chi_{12}^2) = \\ = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{B} \left( \frac{\partial B}{\partial x} \gamma_{xy} + \frac{1}{2} B \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \varepsilon_y - \frac{\partial A \varepsilon_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{A} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \gamma_{xy} + \frac{1}{2} A \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} \varepsilon_x - \frac{\partial B \varepsilon_y}{\partial x} \right) \right].$$

Здесь

$$\chi_1 = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} \theta_2, \quad \chi_2 = \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_2}{\partial y} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} \theta_1, \quad 2\chi_{12} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial \theta_1}{\partial y} - \frac{1}{AB} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \theta_1 + \frac{\partial B}{\partial x} \theta_2 \right).$$

Из соотношений

$$N_x = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y), \quad N_y = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x), \quad N_{xy} = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \gamma_{xy}$$

выразим деформации через усилия и заменим в них усилия выражениями (1)

$$\tilde{\varepsilon}_x = \frac{1}{Eh} (N_x - \mu N_y) = \frac{1}{Eh} (F_1(\Phi) - \mu F_2(\Phi)), \\ \tilde{\varepsilon}_y = \frac{1}{Eh} (N_y - \mu N_x) = \frac{1}{Eh} (F_2(\Phi) - \mu F_1(\Phi)), \quad (2) \\ \tilde{\gamma}_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{Eh} N_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{Eh} F_3(\Phi).$$

Здесь  $E, \mu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки.

Далее подставим найденные выражения деформаций в третье уравнение совместности деформаций.

Для обоснования рассмотренного приема вывода уравнений в смешанной форме и вывода третьего уравнения совместности деформаций рассмотрим вариационный метод вывода уравнений в смешанной форме (Карпов, 2010).

Уравнения в смешанной форме можно получить из условия минимума полного функционала (Абовский, Андреев и Деруга, 1978), который может быть записан в виде

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ 2N_x \varepsilon_x - N_x \tilde{\varepsilon}_x + 2N_y \varepsilon_y - N_y \tilde{\varepsilon}_y + 2N_{xy} \gamma_{xy} - N_{xy} \tilde{\gamma}_{xy} + 2M_x \chi_1 - M_x \tilde{\chi}_1 + 2M_y \chi_2 - M_y \tilde{\chi}_2 + \right. \\ \left. + 2M_{xy} 2\chi_{12} - M_{xy} 2\tilde{\chi}_{12} - 2qW \right\} AB dx dy. \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  — деформации, выраженные через перемещения, а  $\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\gamma}_{xy}$  — деформации, выраженные через усилия (2);  $\chi_1, \chi_2, \chi_{12}$  — деформации, связанные с изгибом и кручением, выраженные через прогиб  $W$ , а  $\tilde{\chi}_1, \tilde{\chi}_2, \tilde{\chi}_{12}$  — деформации выраженные через моменты, но для оболочек постоянной толщины они совпадают, соответственно, с  $\chi_1, \chi_2, \chi_{12}$ .

Находя первую вариацию функционала (3) и приравнявая ее к нулю, получим

$$\delta E_p = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ 2N_x \delta \left[ B \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} V - ABk_x W + \frac{1}{2} AB\theta_1^2 \right] + 2\varepsilon_x \delta \left[ A \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{Eh} N_x \delta \left[ A \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \mu B \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \mu \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] - \tilde{\varepsilon}_x \delta \left[ A \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] + 2N_y \delta \left[ A \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x} U - ABk_y W + \frac{1}{2} AB\theta_2^2 \right] + 2\varepsilon_y \delta \left[ B \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{Eh} N_y \delta \left[ B \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \mu A \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{B} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - \mu \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right] - \tilde{\varepsilon}_y \delta \left[ B \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{A} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right] + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + 2N_{xy}\delta\left[B\frac{\partial V}{\partial x} + A\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y}U - \frac{\partial B}{\partial x}V + AB\theta_1\theta_2\right] + 2\gamma_{xy}\delta\left[\frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial y}\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\frac{\partial\Phi}{\partial y} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}\right] - \\
& - 2\frac{(1+\mu)}{Eh}N_{xy}\delta\left[\frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial y}\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\frac{\partial\Phi}{\partial y} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}\right] - \tilde{\gamma}_{xy}\delta\left[\frac{1}{A}\frac{\partial A}{\partial y}\frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\frac{\partial\Phi}{\partial y} - \frac{\partial^2\Phi}{\partial x\partial y}\right] + \\
& + D(\chi_1 + \mu\chi_2)\delta\left[B\frac{\partial\theta_1}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y}\theta_2\right] + D\chi_1\delta\left[B\frac{\partial\theta_1}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y}\theta_2 + \mu A\frac{\partial\theta_2}{\partial y} + \mu\frac{\partial B}{\partial x}\theta_1\right] + \\
& + D(\chi_2 + \mu\chi_1)\delta\left[A\frac{\partial\theta_2}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x}\theta_1\right] + D\chi_2\delta\left[A\frac{\partial\theta_2}{\partial y} + \frac{\partial B}{\partial x}\theta_1 + \mu B\frac{\partial\theta_1}{\partial x} + \mu\frac{\partial A}{\partial y}\theta_2\right] + \\
& + 2D\bar{\mu}2\chi_{12}\delta\left[B\frac{\partial\theta_2}{\partial x} + A\frac{\partial\theta_1}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y}\theta_1 - \frac{\partial B}{\partial x}\theta_2\right] - 2ABq\delta W\}dxdy = 0,
\end{aligned}$$

где  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ ,  $\bar{\mu} = 0,5(1-\mu)$ .

Преобразуем вариационное уравнение таким образом, чтобы под знаком двойного интеграла не было вариаций от производных функций  $U, V, W, \Phi$ . В результате получим

$$\begin{aligned}
& - \int_0^a \int_0^b \left\{ 2 \left[ \frac{\partial BN_x}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} N_y + \frac{\partial AN_{xy}}{\partial y} + N_{xy} \frac{\partial A}{\partial y} \right] \delta U + 2 \left[ \frac{\partial AN_y}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} N_x + \frac{\partial BN_{xy}}{\partial x} + N_{xy} \frac{\partial B}{\partial x} \right] \delta V + \right. \\
& + \left[ - \frac{\partial}{\partial y} \left( 2 \frac{1}{B} \frac{\partial A \varepsilon_x}{\partial y} - \frac{1}{B} \frac{\partial A \tilde{\varepsilon}_x}{\partial y} - 2 \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \varepsilon_y + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\varepsilon}_y - 2 \frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} \gamma_{xy} + \frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial x} \right) - \right. \\
& \left. - \frac{\partial}{\partial x} \left( 2 \frac{1}{A} \frac{\partial B \varepsilon_y}{\partial x} - \frac{1}{A} \frac{\partial B \tilde{\varepsilon}_y}{\partial x} - 2 \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \varepsilon_x + \frac{1}{A} \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\varepsilon}_x - 2 \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial y} \gamma_{xy} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial y} \right) + \right. \\
& + \frac{1}{Eh} \left( \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial AN_x}{\partial y} + \mu \frac{\partial A}{\partial y} N_x - \frac{\partial A}{\partial y} N_y - \mu \frac{\partial AN_y}{\partial y} - 2(1+\mu) \frac{\partial B}{\partial x} N_{xy} - (1+\mu) B \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial BN_y}{\partial x} + \mu \frac{\partial B}{\partial x} N_y - \frac{\partial B}{\partial x} N_x - \mu \frac{\partial BN_x}{\partial x} - 2(1+\mu) \frac{\partial A}{\partial y} N_{xy} - (1+\mu) A \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} \right) \right) \delta \Phi + \\
& + 2 \left[ AB(k_x N_x + k_y N_y) - \frac{\partial}{\partial x} B(N_x \theta_1 + N_{xy} \theta_2) - \frac{\partial}{\partial y} A(N_y \theta_2 + N_{xy} \theta_1) + \right. \\
& + D \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial}{\partial x} B(\chi_1 + \mu\chi_2) - \frac{\partial B}{\partial x} (\chi_2 + \mu\chi_1) + \bar{\mu} \frac{\partial}{\partial y} (A2\chi_{12}) + \bar{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} 2\chi_{12} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial}{\partial y} A(\chi_2 + \mu\chi_1) - \frac{\partial A}{\partial y} (\chi_1 + \mu\chi_2) + \bar{\mu} \frac{\partial}{\partial x} (B2\chi_{12}) + \bar{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} 2\chi_{12} \right) \right) + ABq \delta W \} dxdy + \\
& + \int_0^b \left\{ 2BN_x \delta U + 2BN_{xy} \delta V + \frac{1}{A} \left[ 2 \frac{\partial B}{\partial x} \varepsilon_x - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\varepsilon}_x - 2 \frac{\partial B \varepsilon_y}{\partial x} + \frac{\partial B \tilde{\varepsilon}_y}{\partial x} + 2 \frac{\partial A}{\partial y} \gamma_{xy} - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\gamma}_{xy} + 2A \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} - \right. \right. \\
& \left. \left. - A \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial y} - \frac{1}{Eh} \left( \mu \frac{\partial BN_x}{\partial x} + \frac{\partial B}{\partial x} N_x - \frac{\partial BN_y}{\partial x} - \mu \frac{\partial B}{\partial x} N_y + 2(1+\mu) A \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} + 2(1+\mu) \frac{\partial A}{\partial y} N_{xy} \right) \right] \delta \Phi + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{B}{A} \left[ 2\varepsilon_y - \tilde{\varepsilon}_y + \frac{1}{Eh} (\mu N_x - N_y) \right] \delta \frac{\partial \Phi}{\partial x} + 2 \left[ -BN_x \theta_1 - BN_{xy} \theta_2 + D \frac{1}{A} \left( \frac{\partial}{\partial x} B(\chi_1 + \mu \chi_2) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\partial B}{\partial x} (\chi_2 + \mu \chi_1) + 2\bar{\mu} \frac{\partial A 2\chi_{12}}{\partial y} \right) \right] \delta W - 2D \frac{B}{A} (\chi_1 + \mu \chi_2) \delta \frac{\partial W}{\partial x} \Bigg|_{x=0}^{x=a} dy + \\
 & + \int_0^a \left\{ 2AN_{xy} \delta U + 2AN_y \delta V + \frac{1}{B} \left[ -2 \frac{\partial A \varepsilon_x}{\partial y} + \frac{\partial A \tilde{\varepsilon}_x}{\partial y} + 2 \frac{\partial A}{\partial y} \varepsilon_y - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\varepsilon}_y + 2 \frac{\partial B}{\partial x} \gamma_{xy} - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\gamma}_{xy} + 2B \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - B \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{Eh} \left( \frac{\partial AN_x}{\partial y} + \mu \frac{\partial A}{\partial y} N_x - \frac{\partial A}{\partial y} N_y - \mu \frac{\partial AN_y}{\partial y} - 2(1+\mu) \frac{\partial B}{\partial x} N_{xy} - 2(1+\mu) B \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} \right) \right] \delta \Phi + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{A}{B} \left[ 2\varepsilon_x - \tilde{\varepsilon}_x - \frac{1}{Eh} (N_x - \mu N_y) \right] \delta \frac{\partial \Phi}{\partial y} + 2 \left[ -AN_y \theta_2 - AN_{xy} \theta_1 + D \frac{1}{B} \left( \frac{\partial}{\partial y} A(\chi_2 + \mu \chi_1) - \right. \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \frac{\partial A}{\partial y} (\chi_1 + \mu \chi_2) + 2\bar{\mu} \frac{\partial B 2\chi_{12}}{\partial x} \right) \right] \delta W - 2D \frac{A}{B} (\chi_2 + \mu \chi_1) \delta \frac{\partial W}{\partial y} \Bigg|_{y=0}^{y=b} dx - \\
 & \quad \left. - \left[ 2\gamma_{xy} - \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{2(1+\mu)}{Eh} N_{xy} \right] \delta \Phi \Bigg|_{x=0}^{x=a} \Bigg|_{y=0}^{y=b} - 4\bar{\mu} D 2\chi_{12} \delta W \Bigg|_{x=0}^{x=a} \Bigg|_{y=0}^{y=b} = 0.
 \end{aligned}$$

Сомножители при  $\delta U$  и  $\delta V$  в двойном интеграле должны равняться нулю, а это 1-е и 2-е уравнения равновесия.

Проведем некоторый анализ полученного вариационного уравнения, заметим, что  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  и  $\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\gamma}_{xy}$  — это одни и те же деформации, только имеющие разные выражения, так что  $\varepsilon_x - \tilde{\varepsilon}_x = 0$ ,  $\varepsilon_y - \tilde{\varepsilon}_y = 0$ ,  $\gamma_{xy} - \tilde{\gamma}_{xy} = 0$ . Поэтому в одномерных интегралах сомножители при  $\delta \Phi$ ,  $\delta \frac{\partial \Phi}{\partial x}$ ,  $\delta \frac{\partial \Phi}{\partial y}$  будут тождественно равны нулю.

Теперь исследуем сомножители в двойном интеграле при  $\delta \Phi$ . Подчеркнутое выражение можно записать в виде

$$- \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A \varepsilon_x}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \varepsilon_y - \frac{\partial B}{\partial x} \gamma_{xy} - \frac{1}{2} B \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B \varepsilon_y}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} \varepsilon_x - \frac{\partial A}{\partial y} \gamma_{xy} - \frac{1}{2} A \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} \right) \right].$$

Это выражение представляет собой правую часть третьего уравнения совместности деформаций. Если в него подставить выражение деформаций через перемещения, то члены, содержащие  $U$  и  $V$ , взаимно сократятся, и оно примет вид

$$- AB(k_x \chi_2 + k_y \chi_1 - \chi_1 \chi_2 + \chi_1^2).$$

Неподчеркнутое выражение, стоящее сомножителем при  $\delta \Phi$  в двойном интеграле, можно преобразовать:

$$\frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A \tilde{\varepsilon}_x}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\varepsilon}_y - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} B \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B \tilde{\varepsilon}_y}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\varepsilon}_x - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} A \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial y} \right).$$

Таким образом, сомножитель при  $\delta \Phi$  в двойном интеграле примет вид

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[ \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A \tilde{\varepsilon}_x}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\varepsilon}_y - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} B \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B \tilde{\varepsilon}_y}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\varepsilon}_x - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} A \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial y} \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A \varepsilon_x}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \varepsilon_y - \frac{\partial B}{\partial x} \gamma_{xy} - \frac{1}{2} B \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B \varepsilon_y}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} \varepsilon_x - \frac{\partial A}{\partial y} \gamma_{xy} - \frac{1}{2} A \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} \right) \right] \delta \Phi.
 \end{aligned}$$

Последние два слагаемых, исходя из уравнения совместности деформаций, равны

$$-AB(k_x\chi_2 + k_y\chi_1 - \chi_1\chi_2 + \chi_{12}^2).$$

Так как множитель перед  $\delta\Phi$  в двойном интеграле должен обращаться в ноль, то получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A \tilde{\varepsilon}_x}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\varepsilon}_y - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} B \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B \tilde{\varepsilon}_y}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} \tilde{\varepsilon}_x - \frac{\partial A}{\partial y} \tilde{\gamma}_{xy} - \frac{1}{2} A \frac{\partial \tilde{\gamma}_{xy}}{\partial y} \right) = \\ = AB(k_x\chi_2 + k_y\chi_1 - \chi_1\chi_2 + \chi_{12}^2). \end{aligned}$$

С одной стороны вариационным методом получено третье уравнение совместности деформаций. С другой стороны, подставив вместо  $\tilde{\varepsilon}_x, \tilde{\varepsilon}_y, \tilde{\gamma}_{xy}$  их выражения (2), получим одно из уравнений в смешанной форме. Второе уравнение в смешанной форме получается приравнением нулю множителя при  $\delta W$  в двойном интеграле и подстановкой в него вместо усилий выражений (1):

$$\begin{aligned} AB(k_x F_1(\Phi) + k_y F_2(\Phi)) - \frac{\partial}{\partial x} B(F_1(\Phi)\theta_1 + F_3(\Phi)\theta_2) - \frac{\partial}{\partial y} A(F_2(\Phi)\theta_2 + F_3(\Phi)\theta_1) + \\ + D \left[ \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial}{\partial x} B(\chi_1 + \mu\chi_2) - \frac{\partial B}{\partial x} (\chi_2 + \mu\chi_1) + \bar{\mu} \frac{\partial}{\partial y} (A2\chi_{12}) + \bar{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} 2\chi_{12} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial}{\partial y} A(\chi_2 + \mu\chi_1) - \frac{\partial A}{\partial y} (\chi_1 + \mu\chi_2) + \bar{\mu} \frac{\partial}{\partial x} (B2\chi_{12}) + \bar{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} 2\chi_{12} \right) \right] + ABq = 0, \quad (4) \\ - AB(k_x\chi_2 + k_y\chi_1 - \chi_1\chi_2 + \chi_{12}^2) + \frac{1}{Eh} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{B} \left( \frac{\partial A F_1(\Phi)}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} F_2(\Phi) - \frac{\partial B F_3(\Phi)}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} F_3(\Phi) \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{A} \left( \frac{\partial B F_2(\Phi)}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} F_1(\Phi) - \frac{\partial A F_3(\Phi)}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} F_3(\Phi) \right) \right] = 0. \end{aligned}$$

Если рассматриваются пологие оболочки прямоугольного плана ( $A=1, B=1$ ), то уравнения (4) принимают вид

$$\begin{aligned} D\Delta\Delta W = L(W, \Phi) + \nabla_k^2 \Phi + q, \\ \frac{1}{Eh} \Delta\Delta\Phi + \frac{1}{2} L(W, W) + \nabla_k^2 W = 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad \nabla_k^2 A_1 = k_x \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} + k_y \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2}, \\ L(A_1, A_2) = \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 A_2}{\partial x \partial y}. \end{aligned}$$

Система уравнений (4) — это система дифференциальных уравнений в частных производных восьмого порядка относительно искомых функций  $W(x, y)$  и  $\Phi(x, y)$  (каждая из этих функций содержит производные до четвертого порядка включительно по переменным  $x$  и  $y$ ). Для решения этой системы необходимо задать по четыре краевых условия на каждом краю оболочки.

Из равенства нулю одномерных интегралов в полученном после преобразования вариационном уравнении, приведя множители, стоящие перед  $\delta U, \delta V, \delta W, \delta \frac{\partial W}{\partial x}, \delta \frac{\partial W}{\partial y}$ , к виду, содержащему усилия и моменты, можно записать краевые условия (множители, стоящие перед  $\delta\Phi, \delta \frac{\delta\Phi}{\delta x}, \delta \frac{\delta\Phi}{\delta y}$  тождественно равны нулю)

- при  $x = 0, x = a$

$$U = 0 \text{ или } N_x = 0, V = 0 \text{ или } N_{xy} = 0,$$

$$W = 0 \text{ или } \frac{1}{AB} \left( \frac{\partial BM_x}{\partial x} - \frac{\partial B}{\partial x} M_y + 2 \frac{\partial AM_{xy}}{\partial y} \right) - N_x \theta_1 - N_{xy} \theta_2 = 0,$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = 0 \text{ или } M_x = 0;$$

- при  $y = 0, y = b$

$$U = 0 \text{ или } N_{xy} = 0, V = 0 \text{ или } N_y = 0,$$

$$W = 0 \text{ или } \frac{1}{AB} \left( \frac{\partial AM_y}{\partial y} - \frac{\partial A}{\partial y} M_x + 2 \frac{\partial BM_{xy}}{\partial x} \right) - N_y \theta_2 - N_{xy} \theta_1 = 0,$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = 0 \text{ или } M_y = 0.$$

Кроме того, в угловых точках контура оболочки при  $x = 0, x = a$  и  $y = 0$  или  $y = b$  имеем  $M_{xy} = 0$  или  $W = 0$ .

Уравнения в смешанной форме часто применяют при шарнирно-подвижном закреплении контура оболочки.

В этом случае, например, при  $x = 0, x = a$   $U \neq 0$ , поэтому должно быть  $N_x = F_1(\Phi) = 0, V = 0, W = 0, M_x = 0$ . Функция  $W(x, y)$  вдоль оси  $y$  не должна меняться, поэтому  $\frac{\partial W}{\partial y} = 0$  и, следовательно,  $\varepsilon_y = 0$ .

Таким образом, при  $x = 0, x = a$  должны выполняться условия

$$F_1(\Phi) = 0, W = 0, M_x = D(\chi_1 + \mu\chi_2) = 0,$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{Eh} (F_2(\Phi) - \mu F_1(\Phi)) = 0.$$

## Расчеты

В работе Петрова В.В. (1975) проведен расчет устойчивости пологих оболочек прямоугольного плана (параметры Ляме  $A = 1, B = 1$ ), шарнирно-подвижно закрепленных по контуру, и находящихся под действием внешней равномерно-распределенной нагрузки, притом для решения уравнений в смешанной форме применяется метод Бубнова – Галеркина при одночленной аппроксимации искомых функций и метод последовательных нагружений. При значениях главных безразмерных кривизн оболочки  $k_\xi = k_\eta = 27 \left( k_\xi = \frac{a^2}{hR} \right)$

критическая нагрузка составила  $\bar{P}_{kr} = 509 \left( \bar{P} = \frac{a^4 q}{h^4 E} \right)$ . Проведенный нами расчет этой же конструкции при удержании 9 членов в разложении искомых функций дал результат  $\bar{P}_{kr} = 485$ .

Далее был проведен расчет панелей стальных торообразных оболочек (параметры Ляме  $A = r, B = d + r \sin x$ ) при использовании приведенных ранее уравнений в смешанной форме. В Таблице 1 показаны полученные значения критических нагрузок для всех рассматриваемых панелей при  $d = 2$  м.

Таблица 1. Критические нагрузки панелей стальных торообразных оболочек

No.	$a$ , рад	$b$ , рад	$h$ , м	$r$ , м	$q_{kr}$ , МПа
1	$\pi/2$	$\pi/2$	0.1	13	1.596
2	$\pi/2$	$\pi/2$	0.1	25	0.1448
3	$\pi/2$	$\pi/2$	0.1	5	3.7572
4	$\pi/2$	$\pi/2$	0.05	13	0.0308
5	$\pi/2$	$\pi/2$	0.05	25	0.3872
6	$\pi/2$	$\pi/2$	0.05	5	1.7608
7	$\pi/2$	$\pi/2$	0.025	13	0.3972
8	$\pi/2$	$\pi/2$	0.025	25	0.1936
9	$\pi/2$	$\pi/2$	0.025	5	0.8544

Таким образом, для панелей торообразных оболочек с увеличением толщины оболочки  $h$ , уменьшением радиуса кривизны  $r$  и увеличением угла разворота критическая нагрузка возрастает.

### Выводы

В строительстве оболочечные конструкции используются для покрытия большепролетных сооружений. Кроме пологих оболочек прямоугольного плана большое применение находят панели цилиндрических, конических, тороидальных оболочек и пологие сферические оболочки (купола). Полученные уравнения для оболочек произвольной формы, в которых учитывается геометрическая нелинейность, позволяют легко подбирать аппроксимирующие функции при их расчете для шарнирно-подвижного закрепления контура конструкции. Такой способ закрепления контура оболочки позволяет избежать концентрации напряжений вблизи краев конструкции, т.е. в наиболее опасной зоне, где чаще всего проявляются пластические деформации и деформации ползучести.

### Список литературы

- Donnell LN (1934) A new theory for buckling of thin cylinders under axial compression and bending. *Trans. ASME*, 56.
- Seffen KA (2007) Morphing bistable orthotropic elliptical shallow shells. *Proc. R. Soc. A.*, 463: 67–83. DOI: 10.1098/rspa.2006.1750
- Shen S-H, Yang D-Q (2014) Nonlinear vibration of an isotropic laminated cylindrical shells with piezoelectric fiber reinforced composite actuators. *Ocean Engineering*, 80: 36–49. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.01.016
- Van Campen DH, Bouwman VP, Zhang GQ, ter Weeme BJW (2002) Semi-analytical stability analysis of doubly-curved orthotropic shallow panels — considering the effects of boundary conditions. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 37: 659–667. DOI:10.1016/S0020-7462(01)00090-7
- Zhang J, van Campen DH (2003) Stability and bifurcation of doubly curved shallow panels under quasi-static uniform load. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38: 457–466. DOI:10.1016/S0020-7462(01)00069-5
- Абовский НП, Андреев НП, Деруга АП (1978) Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек. Наука, Москва, РФ.
- Власов ВЗ (1949) Общая теория оболочек и ее приложения в технике. Гостехиздат, Москва, Ленинград, РФ.
- Гольденвейзер АЛ (1940) Уравнения теории оболочек. *Прикладная математика и механика*. 2.

Карпов ВВ (2010) Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: в 2 ч. Ч.1: Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. Физматлит, Москва, РФ.

Коломоец АА, Модин АС (2014) Устойчивость равновесных состояний цилиндрической оболочки при действии неравномерного внешнего давления. *Известия вузов. Строительство*, 1: 13–17.

Крысько ВА (1976) Нелинейная статика и динамика неоднородных оболочек. Изд.-во Саратов. ун-та, Саратов, РФ.

Муштари ХМ (1939) Некоторые обобщения теории тонких оболочек с приложениями к решению задач устойчивости упругого равновесия. *Прикладная математика и механика*, 4: 439–456.

Никитин КЕ, Ступишин ЛЮ, Ватанин АН (2012) Расчет ребристых оболочек в рамках геометрически нелинейной теории методом конечных элементов в смешанной формулировке. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии*. 2(2): 27–30.

Перцев АК, Платонов ЭГ (1987) Динамика оболочек и пластин. Судостроение, Ленинград, РФ.

Петров ВВ (1975) Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. Изд.-во Саратов. ун-та, Саратов, РФ.

Спаская МВ, Трещев АА (2015) Термоупругое деформирование цилиндрической оболочки из анизотропного разносопротивляющегося материала. *Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*, 1(23): 65–74.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВНУТРИПОЛЬНЫХ КОНВЕКТОРОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ**

Виктор Алексеевич Пухкал

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: pva1111@rambler.ru

### **Аннотация**

Для предотвращения поступления потока ниспадающего холодного воздуха от светопрозрачных конструкций в обслуживаемую зону помещения применяются конвекторы с естественной конвекцией, встраиваемые в конструкцию пола. Изготовлен экспериментальный стенд для исследования систем отопления с внутрипольными конвекторами с естественной конвекцией и проведены исследования теплового потока конвектора с различными вариантами расположения нагревательного элемента в установочном коробе: со стороны помещения вплотную к стенке короба; со стороны остекления вплотную к стенке короба; размещение нагревательного элемента в центре короба. Исследования выполнены при различных расстояниях от остекления до конвектора. Выполнено моделирование работы конвектора в программе ANSYS Fluent 14.5. Определены условия применения внутрипольных конвекторов с естественной циркуляцией воздуха.

### **Ключевые**

слова: отопление, внутрипольный конвектор, естественная конвекция

### **Введение**

Внутрипольные конвекторы предназначены для систем водяного отопления жилых, общественных и административных зданий, в том числе детских учреждений, коттеджей и офисов (Борискина, 2012; Крупнов Б, Крупнов Д, 2010; Майоров, 2014; Махов, 2014; коллектив авторов, 2012; НТФ ООО «ВИТРАЕМ», 2008; Babiak, Olesen Bjarne, Petráš, 2013).

Конвекторы с естественной циркуляцией воздуха (естественной конвекцией) применяются для предотвращения поступления потока холодного воздуха от остекления в обслуживаемую зону помещения и создания комфортного микроклимата в помещении.

Монтаж конвекторов выполняется в конструкции пола вдоль окон и стен отапливаемых помещений с подключением к системам водяного отопления. В жилых зданиях они могут быть установлены, например, в вестибюлях, зимних садах и других подобных помещениях. При монтаже внутрипольного конвектора короб с теплообменником скрывают в конструкции пола, погружая в цементную стяжку или проемы, организованные в фальшполах. Видимой остается только декоративная решетка. Решетка может быть продольной или поперечной. Она изготавливается из анодированного или покрытого полимерной краской алюминия, а также из нержавеющей стали, латуни и ценных пород дерева.

У большинства встраиваемых конвекторов короб выполнен из оцинкованной или нержавеющей стали. В качестве нагревательного элемента чаще всего используется медно-алюминиевый теплообменник, но применяются и полностью медные нагревательные элементы (в помещениях с высокой влажностью).

Для удобства монтажа теплообменники делают как концевыми (подающий и обратный трубопроводы подводятся с одной стороны), так и проходными. Конвекторы с односторонним подключением обладают тем преимуществом, что при подсоединении к системе отопления с помощью гибких подводок дают возможность вынимать теплообменник из короба без отключения от системы, что удобно при уборке.

Применяются три варианта размещения нагревательных элементов в корпусе (установочном коробе) (рис. 1):

- вариант 1 — размещение нагревательного элемента со стороны помещения вплотную к стенке короба;
- вариант 2 — размещение нагревательного элемента со стороны остекления вплотную к стенке короба;
- вариант 3 — размещение нагревательного элемента в центре короба.

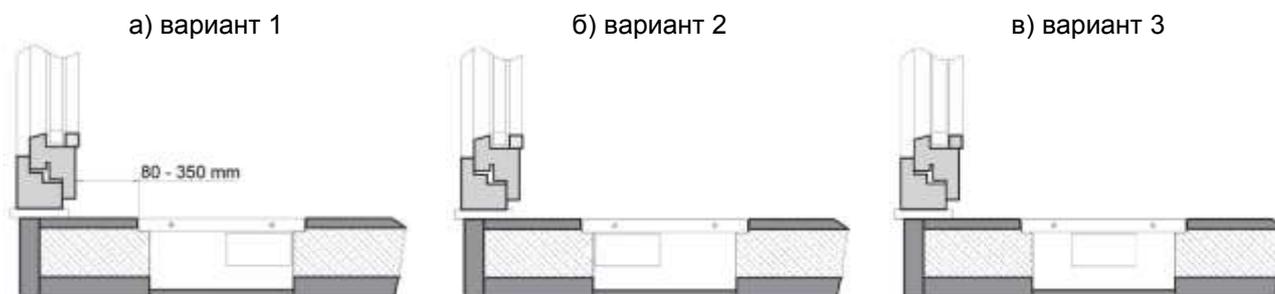


Рис. 1. Варианты расположения нагревательного элемента в установочном коробе

Конвектор располагается непосредственно у остекления или на расстоянии от 80 до 350 мм от стенки (остекления).

### Материалы и методы

Для исследования теплового потока конвектора с различными вариантами расположения нагревательного элемента в установочном коробе в лаборатории кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» СПбГАСУ смонтирован стенд для тепловых испытаний отопительных приборов:

- внутри помещения лаборатории размещен измерительный отопительный контур; закрытая (невентилируемая) испытательная камера с водоохлаждаемыми внутренними поверхностями для обеспечения заданных температурных условий, требуемая по ГОСТ Р 53583-2009 (Росстандарт, 2009), не устраивается в связи с малой теплонапряженностью помещения и отсутствием градиента температуры воздуха по высоте помещения;
- измерение теплового потока отопительного прибора производится «водяным методом» (Росстандарт, 2009): измерением расхода воды, проходящей через отопительный прибор и определением разности энтальпий воды на входе и выходе; в качестве измерительного прибора используется теплосчетчик фирмы «Kamstrup» с автоматической записью измеряемых параметров; дополнительно регистрируется температура внутреннего воздуха в помещении.

Схема теплового стенда приведена на рис. 2. Вода с помощью насоса 2 циркулирует через электрический котел 1 и испытываемый отопительный прибор 5.

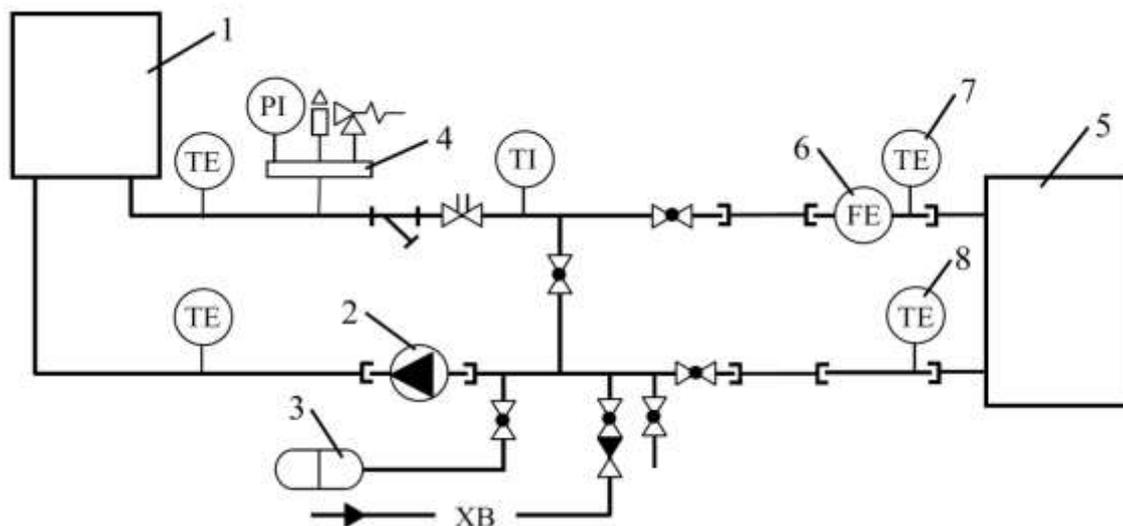


Рис. 2. Схема теплового стенда для испытания отопительных приборов

1 — регулируемый электрический котел; 2 — насос; 3 — расширительный бак; 4 — группа безопасности котла; 5 — испытываемый отопительный прибор; 6 — датчик расхода теплосчетчика; 7 — датчик температуры теплоносителя на входе в прибор; 8 — датчик температуры теплоносителя на выходе из прибора

Выполнены экспериментальные исследования встраиваемого в пол конвектора КРКД 43.14.150 (ОАО «Изотерм», Россия) с восьмитрубным нагревательным элементом. Нагревательный элемент оснащён с двух сторон боковыми отсечными планками высотой 32 мм. Основные размеры испытанной модели конвектора: длина — 1 500 мм; глубина конвектора — 430 мм; высота конвектора — 140 мм. Трубы по ходу теплоносителя подсоединены в каждом ярусе попарно по схеме сверху вниз для двух ярусов.

Конвектор располагался на расстоянии 0, 100, 190 и 300 мм от стенки (остекления).

Для учета фактических условий работы встраиваемого в пол конвектора и детального исследования распределения скоростных и температурных полей в помещении выполнено моделирование работы конвектора в программе ANSYS Fluent 14.5.

В модели рассматривается помещение размерами: ширина — 3 м; глубина — 6 м; высота — 3 м. Моделировался конвектор КРКП-1,058-128 фирмы «Изотерм» (Россия). Конвектор расположен на расстоянии 100 мм от остекления.

При моделировании были заданы следующие условия:

- температуры внутренних поверхностей (боковые стенки, пол, потолок) задавались равными  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- температура наружного воздуха — минус  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- коэффициент теплоотдачи наружной поверхности остекления —  $23\text{ Вт}/(\text{м}^2\text{ К})$ ;
- среднее термическое сопротивление остекления —  $0,685\text{ (м}^2\text{ К)}/\text{Вт}$ ;
- для конвектора задавалась единая температура по всей поверхности, равная  $44,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Результаты

При тепловых испытаниях конвектора установлено, что изменение расстояния от стенки до конвектора в пределах от 100 до 200 мм незначительно сказывается на тепловом потоке конвектора. При увеличении расстояния со 100 до 190 мм в варианте 3 (расположение нагревательного элемента конвектора в центре короба) тепловой поток при среднем температурном перепаде  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  уменьшился на 3 % (с 1 365 Вт до 1 323 Вт). Дальнейшее увеличение расстояния от стенки до конвектора до 300 мм приводит к уменьшению теплового потока на 7 % (с 1 365 Вт до 1 266 Вт).

При расположении конвектора на расстоянии 100 мм от стенки максимальный тепловой поток конвектора обеспечивается при расположении нагревательного элемента у стенки

короба со стороны остекления (1441 Вт). При размещении нагревательного элемента в центре короба тепловой поток снижается на 5 %, а при размещении со стороны помещения — на 22 %.

Уменьшение расстояния со 100 до 0 мм в варианте 1 (размещение нагревательного элемента со стороны помещения вплотную к стенке короба) позволяет увеличить тепловой поток на 3 %.

Выполненная визуализация потоков воздуха задымлением и тепловизионная съемка показывают, что во всех случаях наблюдается настиление нагретой струи воздуха от конвектора на ограждение. При настилении струя поджимается к ограждению и разгоняется. Настилаящаяся на остекление струя повышает температуру остекления (рис. 3).

При размещении нагревательного элемента конвектора со стороны помещения вплотную к стенке короба наблюдается обратный поток воздуха, заходящий через решетку в нагревательный элемент и приводящий к уменьшению теплового потока. Следует отметить, что температура воздуха измеряется в точке, расположенной на центральной оси симметрии, перпендикулярной основанию камеры на расстоянии 0,75 м от пола (Росстандарт, 2009).



Вид внутри кожуха конвектора

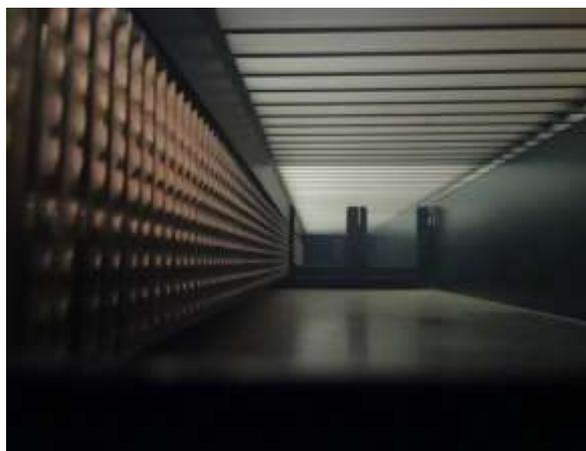


Рис. 3. Визуализация потоков воздуха (задымлением) при расположении нагревательного элемента у стенки короба со стороны помещения (вариант 1); конвектор на расстоянии 100 мм от стенки (остекления)

Качественная картина движения воздушных потоков у нагревательного элемента конвектора и у остекления сохраняется и при компьютерном моделировании (рис. 4).

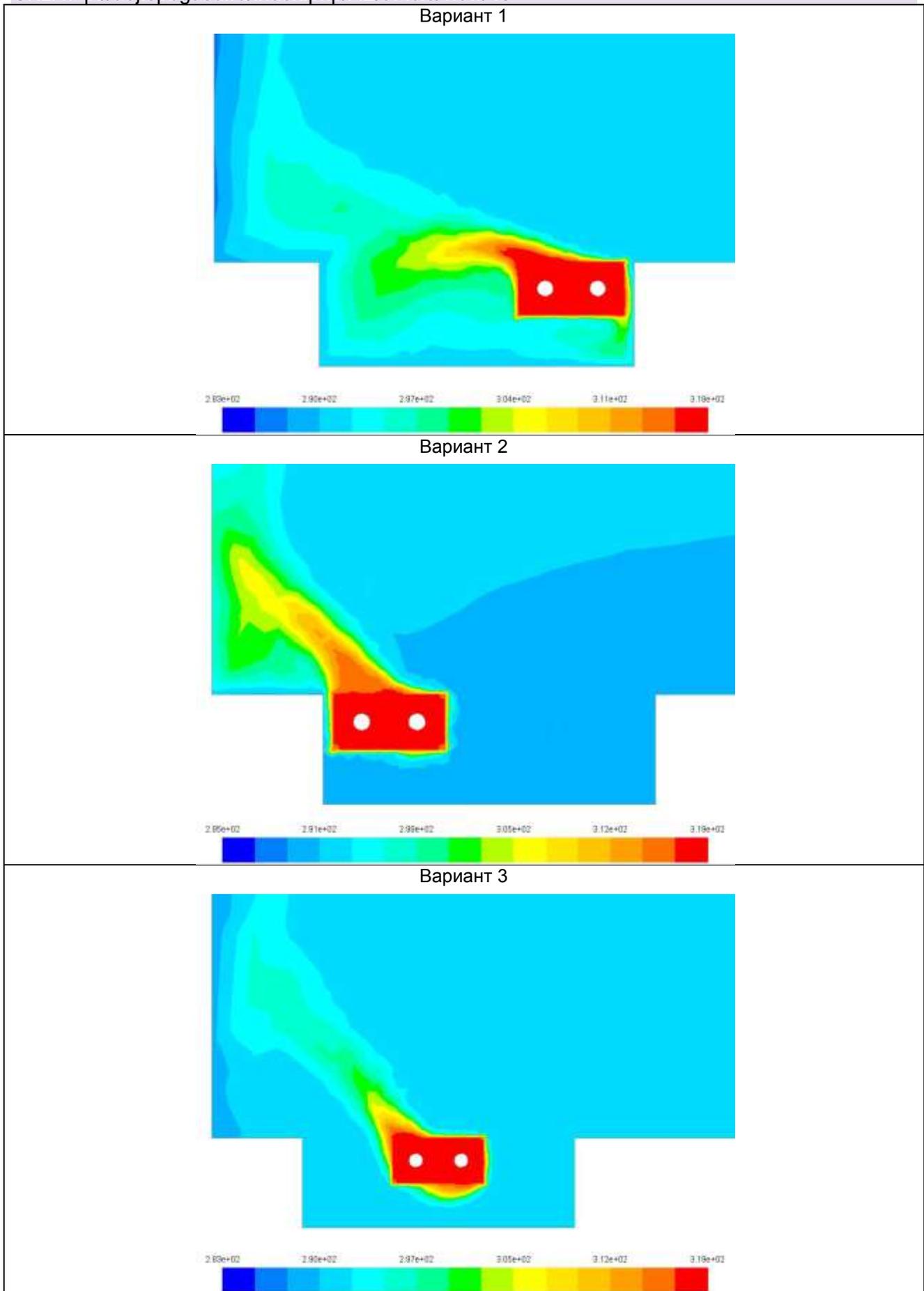


Рис. 4. Температурные поля при различных вариантах расположения нагревательного элемента в установочном коробе (конвектор расположен на расстоянии 100 мм от остекления)

## **Выводы**

1. Встраиваемые в плоскость пола конвекторы создают конвективную струю, настилающуюся на остекление. Для устранения неравномерного обогрева поверхности остекления расстояние от конвектора до поверхности остекления должно быть не менее 100 мм.
2. Рекомендуется размещение нагревательного элемента внутривольного конвектора с естественной циркуляцией воздуха со стороны остекления вплотную к стенке короба. Расстояние от остекления до конвектора должно быть в интервале от 100 до 200 мм.
3. Допускается размещение нагревательного элемента внутривольного конвектора с естественной циркуляцией воздуха в центре короба. Расстояние от остекления до конвектора должно быть в интервале от 100 до 200 мм.

## **Литература**

Babiak J, Olesen Bjarne W, Petráš D (2013) Low Temperature Heating and High Temperature Cooling Embedded. Water Based Surface Heating and Cooling Systems. REHVA.

Борискина И (2012) Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. Инженерно-информационный Центр Оконных Систем, Санкт-Петербург, РФ.

Коллектив авторов (2012) Отопительные приборы и поверхности. Издательский Центр «Аква-Терм», Москва, РФ

Крупнов Б, Крупнов Д (2010) Отопительные приборы, производимые в России и ближнем зарубежье. Издательство Ассоциации строительных вузов, Москва, РФ.

Майоров В (2014) Передача теплоты через окна. Издательство АСВ, Москва, РФ.

Махов Л (2014) Отопление. Издательство Ассоциации строительных вузов, Москва, РФ.

Научно-техническая фирма ООО «ВИТАТЕРМ» (2008) Рекомендации по применению конвекторов «Гольфстрим» («Изотерм-ТД»), встраиваемых в конструкцию пола (вторая редакция). Научно-техническая фирма ООО «ВИТАТЕРМ», Москва, РФ.

Росстандарт (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии) (2009) ГОСТ Р 53583-2009: Приборы отопительные. Методы испытаний. Москва, РФ.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ**

Сергей Васильевич Репин<sup>1</sup>, Сергей Аркадьевич Евтюков<sup>2</sup>, Ярослав Райчык<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф., профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
Email: repinserge@mail.ru

<sup>2</sup> д-р техн. наук, проф., декан автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
Email: s.a.evt@mail.ru

<sup>3</sup> д.т.н., профессор, Ченстоховский политехнический институт

### **Аннотация**

Статья содержит результаты исследований изменения показателей транспортно-технологических машин в процессе эксплуатации: наработки, затрат, выручки, прибыли, рентабельности. Показано, что снижение наработки и увеличение затрат по времени эксплуатации описывается экспоненциальным законом. На основании изменения показателей составлены математические модели для определения оптимальных сроков службы машин по экономическим критериям. Описано применение информационной системы для сбора и обработки данных для использования в моделях.

Применение разработанной методики определения оптимальных сроков службы будет способствовать рациональному формированию парков машин.

### **Ключевые слова**

Транспортно-технологические машины, срок службы, эксплуатация, информационная система.

### **Введение**

Управление технической эксплуатацией сложных объектов, например, транспортно-технологических машин, представляет собой сложную многопараметрическую задачу, для помощи в решении которой разработан целый класс автоматизированных информационных средств — систем управления основными фондами (по западной классификации EAM-системы — Enterprise Asset Management). EAM-системы обеспечивают сбор и обработку эксплуатационной информации, автоматизируют процессы планирования технических обслуживаний и ремонтов, потребности в запчастях и других ресурсах. Одним из направлений развития EAM-систем является их интеллектуализация, заключающаяся в придании им возможности оптимизации производственных процессов за счет внедрения в информационные системы математических моделей, описывающих динамику основных параметров процессов.

На кафедре транспортно-технологических машин Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) разработаны математические модели оптимизации сроков службы техники (Repin, 2015; Репин и др., 2012). Использование этих моделей реализуется путем интеграции их с одной из лучших отечественных EAM-систем, программным комплексом (ПК) TRIM, разработанным специалистами НПП «СпецТек» (г. Санкт-Петербург) и адаптированным совместно с сотрудниками СПбГАСУ для условий эксплуатации транспортно-технологических машин (Репин и др. 2008).

Интеграция возможна двумя методами: путем экспорта данных во внешний программный модуль; внедрением программного модуля непосредственно в TRIM. В качестве внешнего модуля может служить программа, реализованная в математической среде, например, Excel, Mathcad, Statistica и др., в которую экспортируется необходимая информация из ПК TRIM. Данный метод наиболее прост в реализации, но требует установки дополнительного программного обеспечения и обучения пользователей. Метод внедрения программного модуля непосредственно в TRIM связан с его доработкой, но обеспечивает наибольшее удобство пользователей, и поэтому представляется наиболее перспективным.

Разработаны модели оптимизации и прогнозирования сроков службы машин по различным параметрам – экономическим, техническим, экономическим, экологическим. В настоящей статье описывается использование наиболее востребованных – экономических моделей оптимизации сроков службы. Для анализа и прогнозирования нужны данные по наработке машин, выручке и затратам.

### Предмет, задачи и методы

Предметом исследования является ТТМ, технические и экономические показатели эксплуатации которой (надежность, производительность, затраты) изменяются в зависимости от срока службы.

Задача, решаемая в статье — разработка методов обоснования сроков службы машин на основании эксплуатационной информации.

Используются методы статистического анализа и прогнозирования.

### Результаты и обсуждение

#### Описание моделей определения оптимальных сроков службы машин

Значения показателей изменяются по мере старения техники (Smith, 2003, Bujacsek, Slaviński, Grieger, 2013; 6. Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu, 2014; Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016; Protasov, Nikolaychuk, 2011; Makhutov, Reznikov, 2015). Так, наработка машин падает вследствие увеличения времени простоев в ремонтах, а эксплуатационные затраты ( $Z_{пер}$ ) растут с интенсивностью 1,5...4 % в год. Эти изменения достаточно хорошо (с адекватностью 0,88...0,92) описываются экспоненциальной зависимостью с параметром  $\beta = 0,012...0,048 \text{ год}^{-1}$  (Репин, Зазыкин, Евтюков, 2016) (параметр старения по наработке  $\beta_t$  и по затратам  $\beta_z$ ):

$$T_P(t) = T_P(1) \cdot \exp(\beta_t \cdot t), \quad (1)$$

$$Z_{пер}(t) = Z_{пер}(1) \cdot \exp(\beta_z \cdot t), \quad (2)$$

где  $T_P(t)$ ,  $T_P(1)$  — суммарная продолжительность периодов времени пребывания машины в работоспособном состоянии в  $t$ -й и первый год эксплуатации соответственно;  $Z_{пер}(t)$ ,  $Z_{пер}(1)$  — переменная составляющая затрат (эксплуатационные затраты); в  $t$ -й и первый год эксплуатации соответственно;  $t$  — текущий возраст машины, год.

Основанием для расчета выручки  $B(t)$  от эксплуатации машины служит ее наработка, определяемая суммарной продолжительностью периодов времени пребывания машины в работоспособном  $T_P(t)$  в течение расчетного периода (года).

Возможны два основных варианта получения выручки:

предприятие-владелец техники сдает ее в аренду, тогда

$$B(t) = C_{маш-ч} T_P(t) \quad (3)$$

где  $C_{маш-ч}$  — цена машино-часа аренды машины;

предприятие-владелец само использует технику для производства работ, тогда выручка будет связана с производительностью машины  $Q(t)$ , ценой единицы продукции  $c$  и наработкой  $T_P(t)$ :

$$B(t) = \sum Q(t) \cdot c \cdot T_p(t) \cdot k_u, \quad (4)$$

где  $k_u$  — коэффициент использования потенциала машины (рабочего времени, мощности, грузоподъемности и т.п.).

Затраты имеют весьма сложную структуру. В упрощенном виде состав затрат на содержание и эксплуатацию парка машин, можно представить выражением:

$$Z(t) = Z_{\text{пост}}(t) + Z_{\text{пер}}(t). \quad (5)$$

Первое слагаемое экономисты рассматривают как условно-постоянные затраты, не зависящие от количества выпущенной продукции (отработанных машино-часов) за расчетный период.  $Z_{\text{пост}}(t)$  представляют собой в основном издержки владения техникой. Второе слагаемое — переменные затраты  $Z_{\text{пер}}(t)$ , возрастающие пропорционально объему продукции. Это затраты на эксплуатацию машины. Расчет затрат производится согласно нормативным документам. Так, для строительной и автотранспортной техники рекомендуется использовать «Методические указания» Госстроя России (ГОССТОРЙ РОССИИ, 1999).

Прибыль  $\Pi(t)$  рассчитывается как разница выручки  $B(t)$  и затрат  $Z(t)$ :

$$\Pi(t) = B(t) - Z(t). \quad (6)$$

Оптимальный срок службы машины может быть определен по минимуму удельных затрат, приходящихся на машино-час работы машины, максимуму удельной прибыли, заданному минимальному уровню рентабельности  $R_{\text{min}}$ .

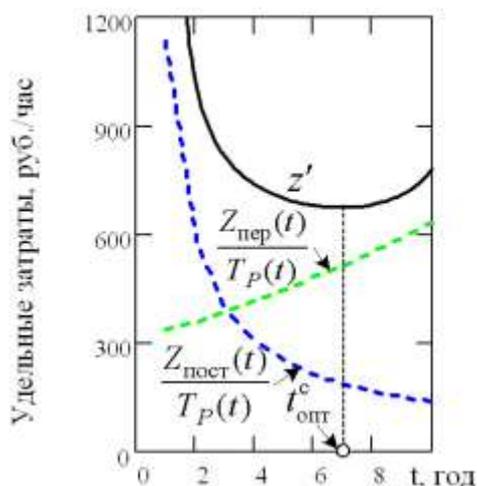


Рисунок 1. Изменение удельных затрат на эксплуатацию машины в зависимости

от срока службы:  $t_{\text{опт}}^c$  — оптимальный срок службы машины

Удельные затраты, приведенные к машино-часу эксплуатации определяются по формуле (рисунок 1):

$$z'(t) = \frac{Z_{\text{пост}}(t) + Z_{\text{пер}}(t)}{T_p(t)}. \quad (7)$$

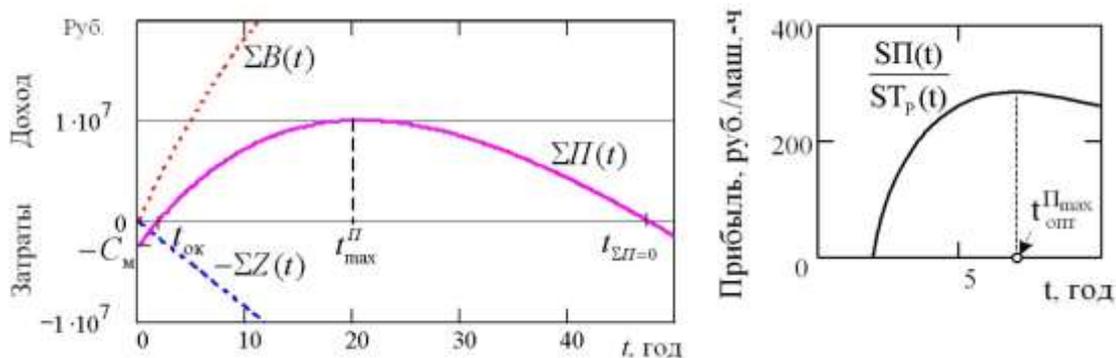
Рассмотрим динамику накопленной за срок службы машины прибыли. По мере старения машины значение выручки будет падать, т.к. согласно формуле (1) будет уменьшаться наработка машины в единицу времени. Затраты же будут возрастать в соответствии с выражением (2). В течение срока службы суммарная выручка  $SB(t) = \sum B(t)$  и суммарные затраты  $SZ(t) = \sum Z(t)$  составят суммарную (накопленную) прибыль от эксплуатации машины (рисунок 2, а):

$$S\Pi(t) = -C_M + SB(t) - SZ(t), \quad (8)$$

где  $C_M$  — стоимость приобретения машины.

График суммарной прибыли  $S\Pi(t)$  имеет четыре характерные точки в моменты времени: 0,  $t_{\text{ок}}$ ,  $t_{\text{max}}^{\Pi}$  и  $t_{S\Pi=0}$ . При  $t=0$   $S\Pi(t) = -C_M$ . До момента времени окупаемости  $t_{\text{ок}}$  значение суммарной прибыли остается меньшим нуля. Максимум  $S\Pi(t)$  достигается при  $t_{\text{max}}^{\Pi}$ . В этот момент становятся равными величины годовых выручки и затрат. Эксплуатация машины должна быть прекращена ранее времени  $t_{\text{max}}^{\Pi}$ . Дальнейшее использование машины будет приносить убыток, и к моменту  $t_{S\Pi=0}$  затраты на поддержание работоспособности старой машины «съедят» всю прибыль.

Таким образом, оптимальный срок службы машины находится в интервале времени от  $t_{ок}$  до  $t_{max}^{\Pi}$ . Более конкретно можно прогнозировать оптимальный срок службы по модели динамики удельной накопленной прибыли (рисунок 2, б).



а б  
Рисунок 2. Динамика накопленной прибыли  $\Sigma\Pi(t)$  (а) и удельной прибыли (б) за срок службы машины:  $S\mathcal{B}(t)$ ,  $S\mathcal{Z}(t)$ ,  $S\mathcal{T}_p(t)$  — накопленные выручка, затраты и наработка;  $C_m$  — стоимость новой машины;  $t_{ок}$  — срок окупаемости;  $t_{max}^{\Pi}$  — срок службы по максимуму накопленной прибыли;  $t_{\Sigma\Pi=0}$  — срок службы, при котором затраты на поддержание работоспособности машины «съедают» всю прибыль;  $t_{opt}^{\Pi_{max}}$  — оптимальный срок службы по максимальному значению удельной накопленной прибыли

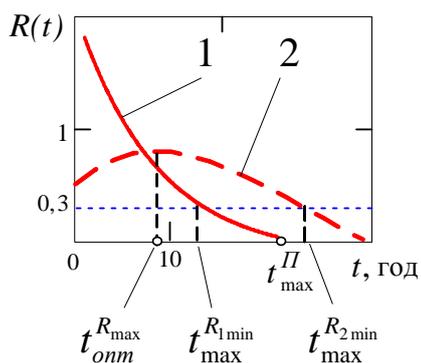


Рисунок 3. Определение срока службы по уровню рентабельности:

$t_{max}^{R_{1min}}$ ,  $t_{max}^{R_{2min}}$  – срок службы по минимально допустимому нормативному уровню рентабельности (0,3);  $t_{opt}^{R_{max}}$  – оптимальный срок службы по максимальному уровню рентабельности  $R_{max}$ ; линии 1 и 2 соответствуют равномерному и ускоренному (с коэффициентом два) методам расчета амортизационных отчислений

Дополнительную информацию по выбору срока службы может дать анализ уровня рентабельности эксплуатации машины:

$$R(t) = \Pi(t) / Z(t) \geq R_{min}, \quad (9)$$

который является одним из основных экономических показателей. Задавшись нижним значением  $R_{min}$ , например 0,3 (рисунок 3), получаем максимальный срок службы  $t_{max}^{R_{min}}$  по условию нижнего предела уровня рентабельности, который зависит от метода расчета амортизационных отчислений.

Модели определения сроков службы по минимуму удельных затрат и максимуму удельной прибыли (оптимальные значения примерно совпадают) целесообразно применять в случае наличия у эксплуатирующей организации средств для обновления парка машин. В этом случае можно будет выручить значительные суммы от продажи машины (рыночная стоимость снижается примерно

на 20% в год от текущего значения рыночной стоимости). Модель минимума уровня рентабельности применима для предприятий, испытывающих дефицит средств для приобретения новой техники.

### Использование ПК TRIM для анализа и прогнозирования наработки машин

Параметры  $\beta_t$  и  $\beta_z$  зависят от качества изготовления техники, условий эксплуатации и уровня совершенства системы технической эксплуатации (СТЭ) и для каждой единицы техники имеют свое определенное значение. Параметры  $\beta_t$  и  $\beta_z$  определяются на основе анализа статистической информации. Для сбора информации для расчета  $\beta_t$  можно использовать ПК

TRIM (рисунок 4), для расчета затрат — данные бухгалтерии (Репин и др., 2008; Репин, Бондаренко 2012).

По собранным за период наблюдений  $n$  лет, например, пять лет значениям  $T_p(t)$  из зоны анализа (рисунок 5), вычисляется среднее значение  $\beta_{tcp}$ :

$$\beta_{i_i} = \frac{-\ln[T_p(i)/T_p(1)]}{i}, \quad \beta_{tcp} = \frac{\sum_{i=2}^n \beta_{i_i}}{i} \quad (10)$$

По значению  $\beta_{tcp}$  прогнозируется наработка в последующие годы. Аналогично определяется  $\beta_{zcp}$ . При наличии данных по нескольким однотипным машинам можно строить усредненный прогноз.

Значение	Ед.	Дата ввода	Разница
23 517	Мото-часы	01.01.2010	667
22 850	Мото-часы	01.12.2009	573
22 277	Мото-часы	01.11.2009	653
21 624	Мото-часы	29.10.2009	0
21 624	Мото-часы	01.10.2009	471
21 153	Мото-часы	01.09.2009	317
20 836	Мото-часы	01.08.2009	678
20 158	Мото-часы	01.07.2009	697
19 461	Мото-часы	01.06.2009	623
18 838	Мото-часы	01.05.2009	704
18 134	Мото-часы	01.04.2009	684
17 450	Мото-часы	01.03.2009	632
16 818	Мото-часы	01.02.2009	671
16 147	Мото-часы	01.01.2009	16147
0	Мото-часы	01.01.2001	0

Рисунок 4. Окно счетчика наработки в программном комплексе TRIM

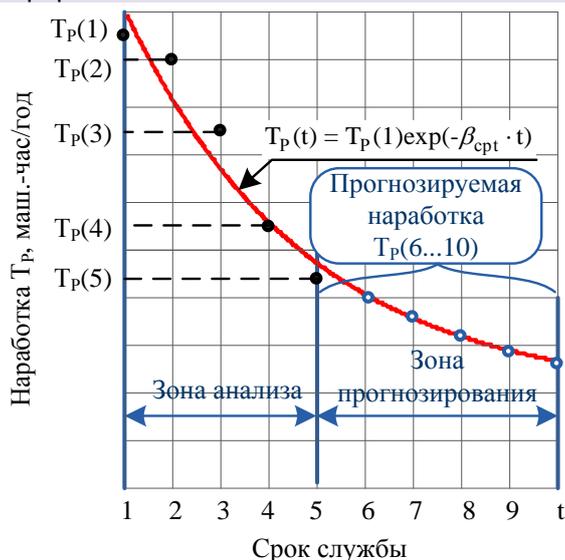


Рисунок 5. Схема к расчету  $\beta_{cpt}$  и прогнозирования наработки

Для анализа удобно использовать передачу данных из TRIM в Excel. Результаты обработки данных в Excel приведены на рисунке 6.

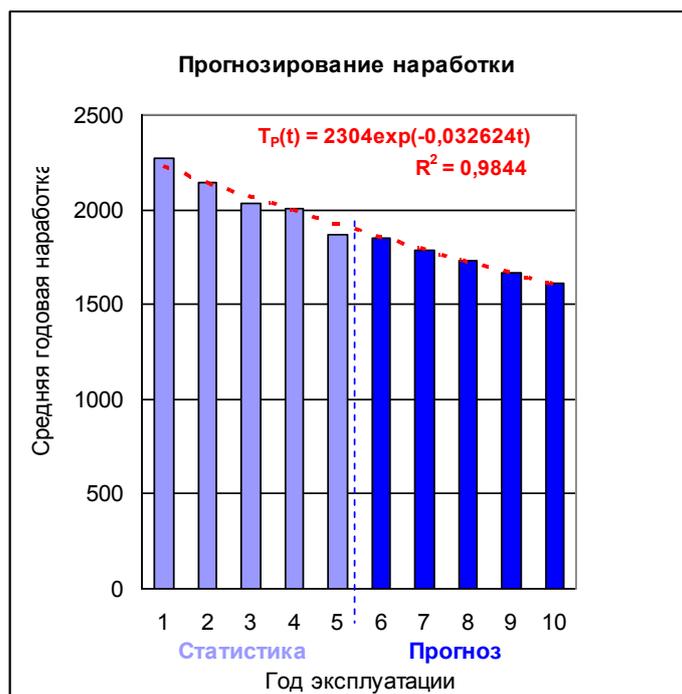


Рисунок 6. График изменения наработки и линия тренда

### Заключение

Представленная методика обработки эксплуатационной информации по наработке парка машин может служить основой для прогнозирования сроков службы не только машин, но и любых технических объектов. Ценность данной методики также заключается в том, что для прогнозирования требуется минимальное количество информации — наработка по периодам эксплуатации и эксплуатационные затраты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка методики формирования структурных элементов

## Литература

Bujaczek R, Sławiński K, Grieger A (2013) Agricultural Machines Maintenance And Repair Services In Western Pomerania. *Technical Sciences*, 16(1): 13–18. See [http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech\\_16\\_1/b02.pdf](http://www.uwm.edu.pl/wnt/technicalsc/tech_16_1/b02.pdf) (accessed 10.05.2016).

Chernyavsky A, Shadchin A (2010) Evaluation of reliability of low damage probability calculations for unitary structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 39(4): 402–406.

Makhutov N, Reznikov D (2015) Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 44(8): 675–686.

Protasov A, Nikolaychuk O (2011) Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 40(1): 27–30.

Repin S (2015) Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726: 990–995.

Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu (2014) Structural Reliability Assessment by Integrating Sensitivity Analysis and Support Vector Machine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. See <http://dx.doi.org/10.1155/2014/586191> (accessed at 10.05.2016).

Smith P (2003) Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application. Gulf Professional Publishing.

ГОССТРОЙ РОССИИ (Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу) (1999) МДС 81-3.99: Методические указания по разработке сметных норм и расценок на эксплуатацию строительных машин и автотранспортных средств. Госстрой России, Москва, РФ.

Репин СВ, Бондаренко АВ (2012) Оптимизация периодичности замен узлов транспортных и технологических машин на основе информации по динамике параметров их технического состояния. *Вестник гражданских инженеров*, 2(31), с. 236–243.

Репин СВ, Зазыкин АВ, Евтюков СС (2016) Надежность и эффективность транспортно-технологических машин. Издательский дом «Петрополис», СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Крупин СА (2012) Методология обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин и комплексов средствами технической эксплуатации. Монография. СПбГАСУ, СПб, РФ.

Репин СВ, Рулис КВ, Зазыкин АВ, Ховалыг НК (2008) Методика применения информационной автоматизированной системы управления технической эксплуатацией строительных машин и автотранспорта. СПбГАСУ, СПб, РФ.

## НОВЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ОТ КОРРОЗИИ

Виктор Михайлович Васильев<sup>1</sup>, Юрий Вячеславович Столбихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: 89119311522@bk.ru

<sup>2</sup> Старший преподаватель кафедры водопользования и экологии, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета  
E-mail: Stolbikhin@bk.ru

### Аннотация

В статье приводятся сведения о микробиологической (газовой) коррозии канализационных коллекторов и сооружений на них. Представлены результаты осмотра сооружений в г. Санкт-Петербурге. Приведены результаты эксперимента по определению стойкости защитных покрытий, проведенных в камере гашения напора в г. Новосибирске. В работе рассматриваются известные методы борьбы с коррозией и предлагается новый. Этим способом выступает аэрация сточной жидкости в камере гашения напора за счет естественной эжекции воздуха в подводящий напорный трубопровод. Представлена схема эффективной конструкции камеры гашения напора, позволяющая реализовать предлагаемый способ. Описаны проведенные опыты по моделированию конструкции камеры гашения напора и даны оптимальные значения ее геометрических параметров. Также в статье представлено инженерное решение по совместному размещению камеры и газоочистной установки на канализационном коллекторе. Проведено экономическое сравнение предлагаемого способа с двумя наиболее часто используемыми для защиты коллекторов – футеровкой стеклопластиковыми трубами и покрытием стенок полимерсиликатным составом «Конусит КК-10». Произведен анализ стоимости осуществления способов для различных вариантов диаметров коллектора и его протяженности, а также за различные периоды времени. Доказана эффективность предлагаемого авторами альтернативного способа борьбы с коррозией.

### Ключевые слова

камера гашения напора, микробиологическая коррозия, газовая коррозия, защита от коррозии, исследование защитных покрытий, моделирование канализационных сооружений

### Введение

В России эксплуатируются сотни километров подземных канализационных тоннелей и трубопроводов, значительная часть которых выполнена из железобетона. Отмечается большое количество аварий железобетонных коллекторов и сооружений на них, транспортирующих сточные воды, в том числе в Москве, Санкт-Петербурге, Краснодаре, Уфе, Набережные Челны, Курске, и многих других городах страны.

Основная причина разрушения канализационных коллекторов и сооружений на них – микробиологическая (также известная в литературе как газовая) коррозия. В результате микробиологической коррозии разрушаются железобетонные элементы конструкций и технологическое оснащение канализационных коллекторов, что нарушает отведение сточных вод и наносит вред окружающей среде (Zhang et al, 2008; Wells and Melchers, 2009; Розенталь, 2011; George, 2012). Иногда последствия обрушения коллектора имеют катастрофические последствия, приводят к гибели людей, а также к колоссальному экологическому ущербу в случае попадания сточных вод в водные объекты (Столбихин, 2016).

Проблема микробиологической коррозии является общемировой. Ущерб от микробиологической коррозии мировому водному хозяйству исчисляется миллиардами евро в год (Zhang et al, 2008; Wells and Melchers, 2009). Только в Германии затраты, связанные с ремонтом канализационных сооружений, разрушенных в результате коррозии, превысили 50 млрд. долларов США (Hewayde and Nehdi, 2006). На Украине только за последние годы с 2012 по 2016 зафиксирован ряд аварий в Киеве, Днепропетровске и других городах (Столбихин, 2016).

Проведенные нами исследования на канализационных шахтах Санкт-Петербурга (см. рис.1), подтвердили микробиологическую природу процессов коррозионного разрушения, а также тот факт, что гидравлический и аэродинамический режимы в шахте оказывают влияние на состояние коллектора после нее (Васильев с соавт., 2013). Наличие напорного водовода, подводящего стоки к рассматриваемому сооружению, также является дополнительным усугубляющим фактором.



Рисунок 1 – Канализационные шахты и коллекторы в Санкт-Петербурге, подвергнутые разрушению

Помимо шахт, на канализационных коллекторах также встречаются и камеры гашения напора (КГН), принимающие воды от напорных водоводов насосных станций и направляющие их в коллектор. В работе (Дрозд, 2013) приведены сведения о рекордном разрушении коллектора (всего за 4 года) в Донецке, который как раз принимал сточные воды от камеры гашения напора, к которой стоки подводились по напорному водоводу длиной 11 км.

Существует большое количество методов борьбы с коррозией. Однако применение нашли в основном так называемые пассивные методы, заключающиеся в заблаговременном выборе стойких материалов, находящихся в непосредственном контакте с агрессивной средой. Распространение получил способ футеровки коллекторов по методу «труба в трубе» с применением стеклопластиковых труб, а также нанесение специальных защитных покрытий.

Нами в г. Санкт-Петербурге в 2014 г. был обследован участок тоннельного коллектора, защищенный стеклопластиковыми трубами. Шахты до и после этого участка стремительно разрушаются вследствие микробиологической коррозии, в то время как сам коллектор находится в превосходном состоянии (рис. 2).



Рисунок 2 – Шахты и участок канализационного коллектора, соединяющий их между собой

В г. Новосибирске группой специалистов, возглавляемой В.М. Васильевым, было проведено исследование образцов бетона, защищенных различными материалами (Васильев с соавт., 2015). Образцы бетона, класса В20 и водонепроницаемостью W8, были покрыты различными материалами в целях их защиты от коррозии. Эти образцы были помещены в камеру гашения напора и экспонировались в течение 1 года. Средняя концентрация сероводорода в камере гашения напора составляла ~40 мг/м<sup>3</sup>. В результате наилучшим образом себя проявил полимерсиликатный состав «Конусит КК-10» (производство МС-Vauchemie, Германия), который оказался единственным покрытием, сумевшим защитить образцы бетона от разрушения (см. рис. 3).

Пример материала, не защитившегося бетон от разрушения — «Фторонит»



Материал, защитивший бетон от коррозии «Конусит КК-10»

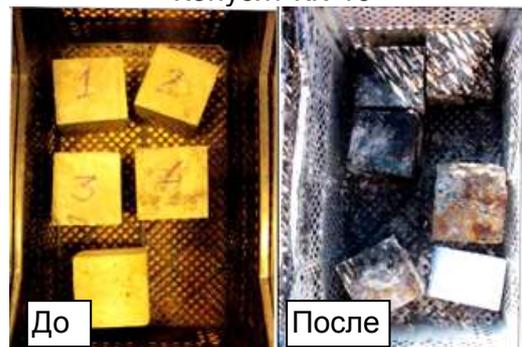


Рисунок 3 — Результаты исследования стойкости защитных покрытий

Таким образом, можно сделать вывод, что представленные выше методы, направленные на отделение поверхности бетона от газовой среды коллекторов и шахт, при правильном выборе защитного материала могут быть достаточно эффективны. Однако вместе с тем эти методы и достаточно дороги. Поэтому ученые по всему миру ищут альтернативные способы борьбы с коррозией. В частности, широко исследуются методы добавления в сточную воду различных химических реагентов. Так, американские ученые сообщают о возможности добавления хлорида железа (Lynne et al, 2009) а индийские – о добавлении Fe<sup>3+</sup> (Zhang et al, 2009). Однако дозирование любых химических реагентов также связано с очень значительными затратами, особенно в случае транспортирования больших объемов сточной жидкости. К примеру, в Санкт-Петербурге ежедневно отводится более 2 млн. м<sup>3</sup> сточных вод, что потребует колоссального количества химических реагентов. Поэтому разработка новых альтернативных методов борьбы с коррозией остается актуальной задачей.

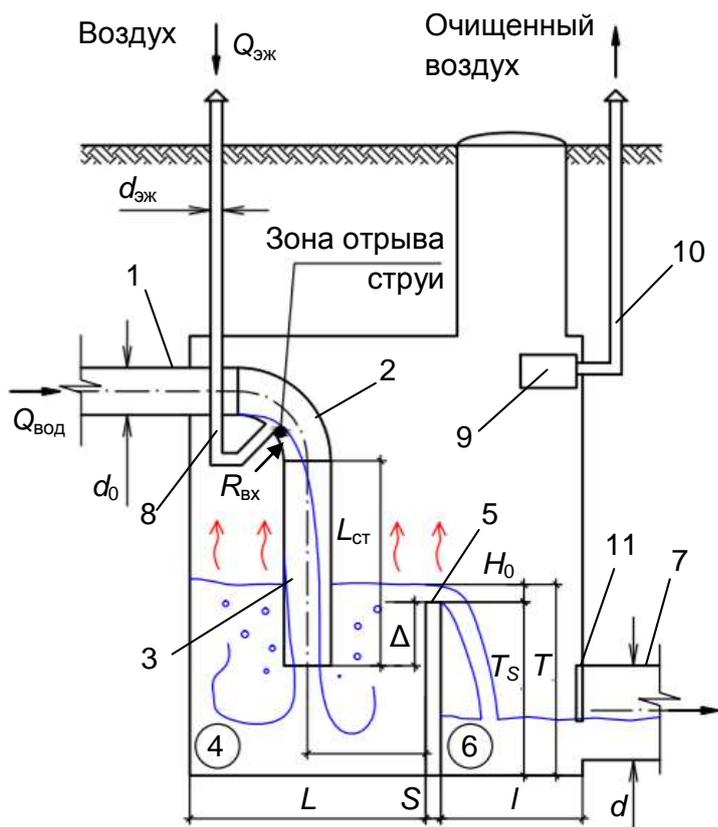
### Материалы и методы

Среди методов борьбы с микробиологической коррозией особо интересным метод насыщения сточной жидкости кислородом воздуха. Способ насыщения жидкости кислородом воздуха (аэрация потока) основывается на представлении о том, что в случае насыщения сточной жидкости растворенным кислородом в достаточных концентрациях, будет происходить окисление образующегося за счет действия сульфатредуцирующих бактерий сероводорода. Концентрации растворенного кислорода выше 0,5 мг/л могут в целом предотвратить образование сульфидов.

В г. Кавасаки (Япония) учеными N.Tanaka и T. Hvitved-Jacobsen было проведено исследование по процессу принудительной инъекции кислорода воздуха в напорный водовод (Tanaka, 2000). При этом, были зафиксированы концентрации растворенного кислорода 0,2 – 1,0 мг/л, а процесс сульфидообразования замедлен или полностью подавлен. Однако принудительная инъекция воздуха в напорный водовод требует значительных затрат электроэнергии в связи с работой компрессорной установки.

В связи с этим было предложено реализовать способ насыщения сточной жидкости кислородом воздуха за счет его естественной эжекции в трубопровод, что возможно выполнить в камере гашения напора. Подобный эксперимент был осуществлен В.М. Васильевым в г. Новосибирске, дав положительный результат. В соответствии с этим нами

была разработана эффективная конструкция камеры гашения напора. Схема эффективной конструкции камеры гашения напора представлена на рис. 4.



1 — подводящий трубопровод; 2 — отвод; 3 — стояк; 4 — резервуар гаситель; 5 — водосливная стенка; 6 — лоток-гаситель; 7 — отводящий коллектор; 8 — трубопровод эжектор; 9 — блок очистки воздуха; 10 — трубопровод отвод очищенного воздуха; 11 — перегородка;  $Q_{\text{вод}}$  — расход воды;  $Q_{\text{эж}}$  — расход эжектируемого воздуха;  $d_0$  — диаметр подводящего трубопровода;  $d_{\text{эж}}$  — диаметр трубопровода-эжектора;  $d$  — диаметр отводящего коллектора;  $R_{\text{вх}}$  — радиус входной воронки;  $L_{\text{ст}}$  — длина резервуара-гасителя;  $l$  — длина лотка-гасителя;  $S$  — толщина водосливной стенки;  $T$  — глубина воды в резервуаре-гасителе;  $T_{\text{с}}$  — высота водосливной стенки;  $\Delta$  — заглубление стояка относительно водосливной стенки;  $H_0$  — напор в водосливе.

Рисунок 4 — Схема эффективной конструкции камеры гашения напора

Сооружение функционирует следующим образом. Вода по подводящему напорному трубопроводу (1) направляется в стояк (2) и попадает в резервуар-гаситель (4). Горизонтальный участок трубопровода и стояк сопряжены между собой либо с помощью отвода (2), имеющего определенный радиус входа  $R_{\text{вх}}$ , или могут быть подсоединены под прямым углом без закругления. В зоне сопряжения данных трубопроводов происходит отрыв струи и образуется зона пониженного давления. Сюда подводится трубопровод-эжектор (8), сообщающийся с атмосферой. Стояк (2) заглублен на величину  $\Delta$  относительно уровня воды в резервуаре-гасителе (4), формируемом с помощью водосливной стенки (5). В резервуаре-гасителе (4) происходит процесс смешения воды и воздуха, сопровождающийся повышением концентрации растворенного кислорода в стоке. Далее азрированная сточная жидкость изливается через водослив в лоток-гаситель (6) и направляется в отводящий коллектор (7).

Для установления наиболее выгодных соотношений диаметров трубопроводов, их линейных параметров относительно других элементов камеры, оптимальных размеров сооружения в плане и по высоте, было проведено моделирование конструкций. Основным критерием, по которому сравнивались между собой конструкции, выступил расход эжектируемого воздуха. Чем больше его значение при равных расходах воды, тем выше будет концентрация кислорода на выходе с камеры гашения напора (Столбихин, 2015).

Моделирование было осуществлено при помощи математических моделей, разработанных в программном комплексе ANSYS, а правильность расчетов подтверждена на физической модели, созданной в лаборатории гидравлики кафедры Водопользования и экологии СПбГАСУ.

### Результаты исследований

Работа с физической моделью камеры гашения показала, что воздух естественным образом увлекается в зону отрыва струи подводящего трубопровода камеры гашения напора. Расход поступающего в систему воздуха измерялся газовым счетчиком. Затем была создана

математическая модель камеры гашения напора, идентичная по своим размерам физической модели. В результате было установлено полное соответствие результатов, получаемых на обеих моделях (см. рис. 5).

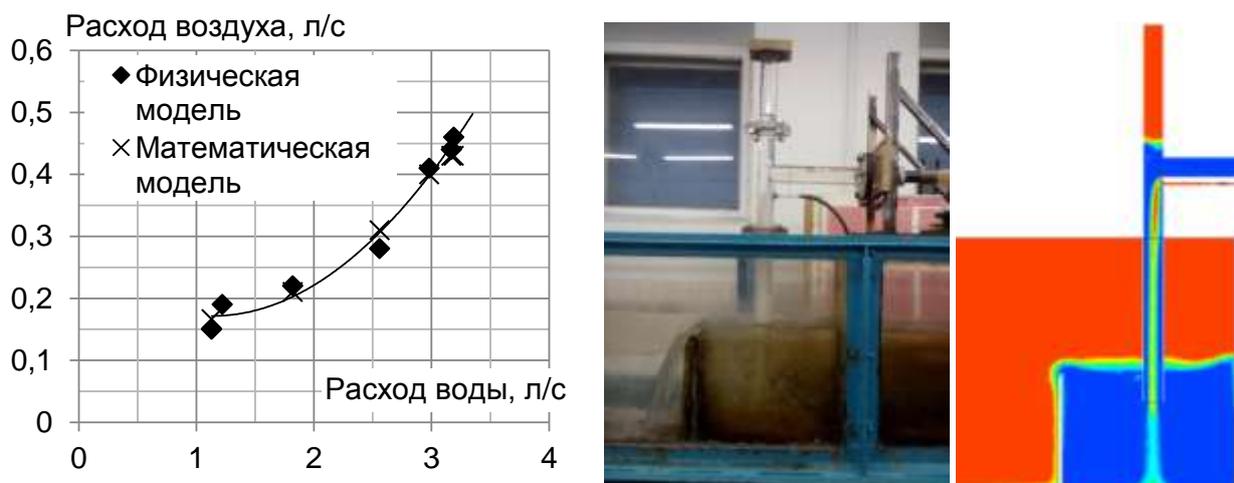


Рисунок 5 — сравнение математической и физической моделей

Далее были разработаны различные полномасштабные модели камер гашения напора и проведены серии численных экспериментов. В результате были установлены оптимальные значения различных параметров камер.

Проведенные исследования показали, что оптимальными значениями для камеры гашения напора являются:

- заглубление:  $\Delta = 0$  мм;
- радиус входа:  $R_{вх} = 0 \cdot d$  мм;
- диаметр трубопровода-эжектора:  $d_{эж} = 1/3 \cdot d_0$ ;
- размеры резервуара-гасителя в плане: минимально допустимые, в соответствии с действующими в той или иной стране нормами, основанными на возможности эксплуатации сооружения;
- глубина камеры гашения напора: зависит от расхода воды (см. табл. 1).

Таблица 1. Рекомендуемое значение  $T_S$  для КГН с  $d_0 = 200 — 800$  мм

Диаметр подводящего трубопровода, мм	200	300	400	500	600	800
Максимальный расход воды, л/с	63	200	375	575	800	1500
Высота водосливной стенки $T_S$ , мм, для КГН с футеровкой	500	700	1000	1100	1200	2100
Высота водосливной стенки $T_S$ , мм, для КГН, имеющей открытую поверхность	800	1000	1300	1400	1500	2550

Приведенные выше параметры гарантируют обеспечение насыщения сточной жидкости кислородом воздуха до требуемых концентраций.

Использование камер гашения напора предлагаемой конструкции, снабженных устройством для эжектирования воздуха и насыщения сточных вод кислородом, будет эффективным для защиты сооружений только в сочетании с отводом грязного воздуха и недопущением его в коллектор после КГН.

Выброс в атмосферу загрязненного воздуха невозможен (ГН 2.1.6.695-98), поэтому необходимо предусматривать его очистку при помощи специальной газоочистной установки (см. рис. 6). В данном случае на рис. 3 показано инженерное решение с использованием в качестве газоочистной установки плазма-каталитического реактора. Необходимо отметить,

что использование подобного реактора, равно, как и любой другой установки для очистки воздуха предполагает включение в технологическую схему вентилятора, т.к. все газоочистные установки обладают высоким аэродинамическим сопротивлением.

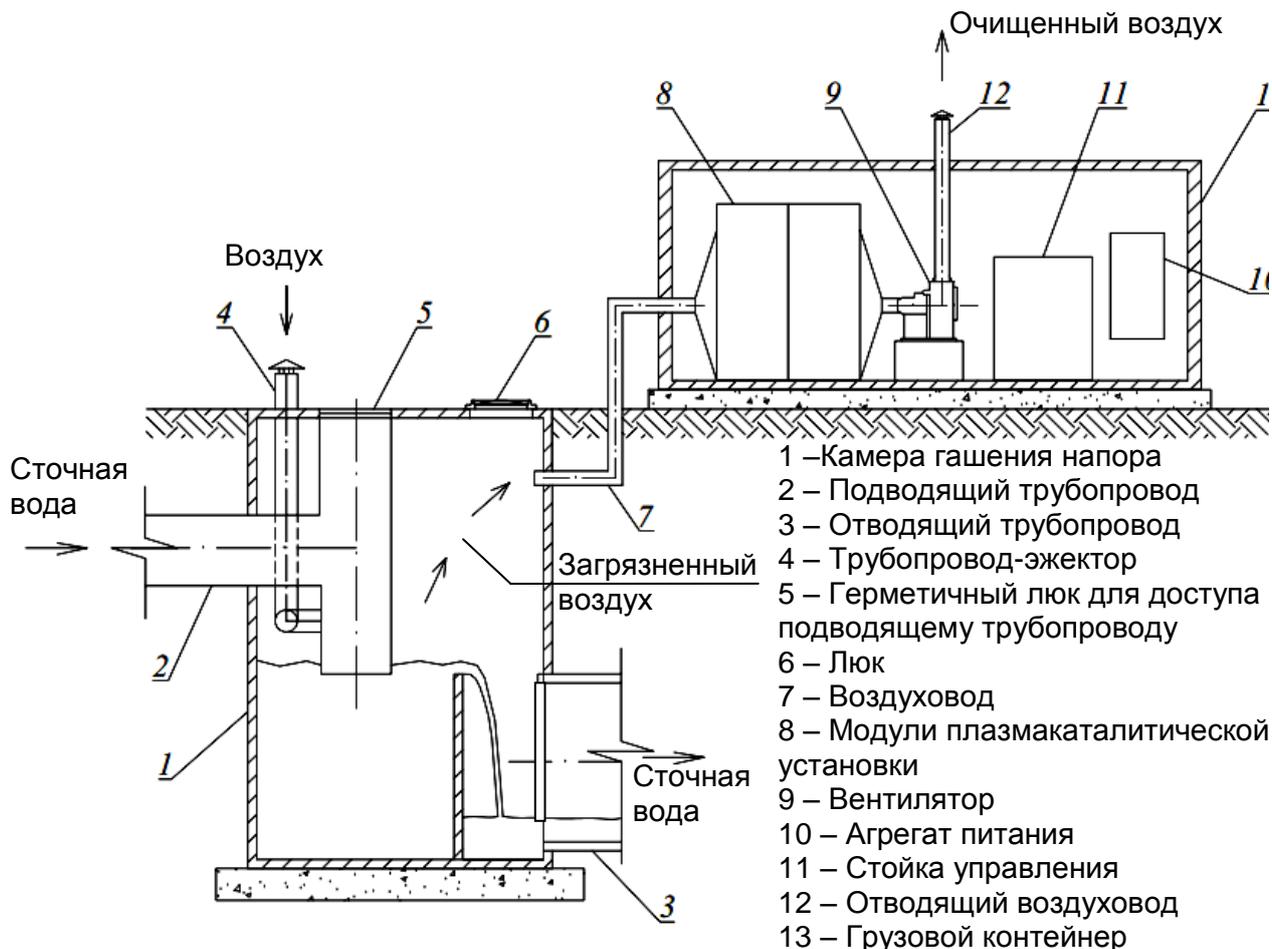


Рисунок 6 – Комплекс «камера гашения напора – газоочистная установка»

В статье приводятся данные об экономическом сравнении предлагаемого В. Васильевым и Ю. Столбихиным метода с методами пассивной защиты канализационных коллекторов. Нами рассматривается упрощенная задача по защите коллектора определенной длины и диаметра (см. рис. 7), и на основании экономического расчета сравниваются между собой следующие способы защиты сооружения от коррозии:

Использование комплекса «камера гашения напора – газоочистная установка»;

Защита коллектора методом «Труба в трубе» с использованием труб фирмы «Hobas»;

Покрытие стенок тоннеля материалом «Конусит КК-10».

Оценка производится по затратам (капитальным и эксплуатационным) для трубопроводов разного диаметра и длины на различные периоды времени (до 100 лет).

Решаемая задача может быть сформулирована следующим образом. Имеется железобетонная камера гашения напора и железобетонный отводящий коллектор. Рассматривается 4 варианта расхода, на который рассчитывается данная система. Диаметр коллектора определяется величиной расчетного расхода и приведен в табл. 2.



Рисунок 7 – Схема для экономического сравнения вариантов защиты коллектора за камерой гашения напора от коррозии

Таблица 2. Рассматриваемые варианты условия задачи

№ варианта	Расчетный расход, л/с	Диаметр коллектора, мм
Вариант 1	750	800
Вариант 2	1150	1000
Вариант 3	1600	1300
Вариант 4	3000	2000

Результаты экономических расчетов представлены на графиках на рисунках 8 и 9.

На рис. 8 представлено сравнение трех способов защиты коллектора длиной 250 метров диаметром 800 – 2000 мм на протяжении периода времени 100 лет. Линии, соответствующие применению способа 1 (комплекс «КГН – газоочистная установка») имеют возрастающий характер за счет эксплуатационных затрат. Эксплуатационных затрат для двух других способов при условии высокого уровня проведения строительных работ не должны быть, и поэтому графически способы 1 и 2 представляются в виде горизонтальных прямых линий, отражающих конечную стоимость защиты коллектора конкретной длины и диаметра.

Из графика видно, что на начальном этапе для всех вариантов диаметров коллектора наиболее выгодным оказывается использование комплекса «КГН – газоочистная установка», однако с течением времени выгоднее становятся другие способы защиты. В табл. 3 представлена продолжительность времени, которая требуется для способов 2 и 3, чтобы стать выгоднее способа 1.

Таблица 3. Время, требующееся, чтобы способ оказался выгоднее комплекса «КГН – газоочистная установка» для коллектора длиной 250 м

Способ защиты Вариант диаметра	Футеровка коллектора трубопроводами «Hobas»	Покрытие стенок тоннеля материалом «Конусит КК-10»
Вариант 1 (d = 800 мм)	25 лет	18 лет
Вариант 2 (d = 1000 мм)	28 лет	7 лет
Вариант 3 (d = 1300 мм)	42 года	23 года
Вариант 4 (d = 2000 мм)	—	37 лет

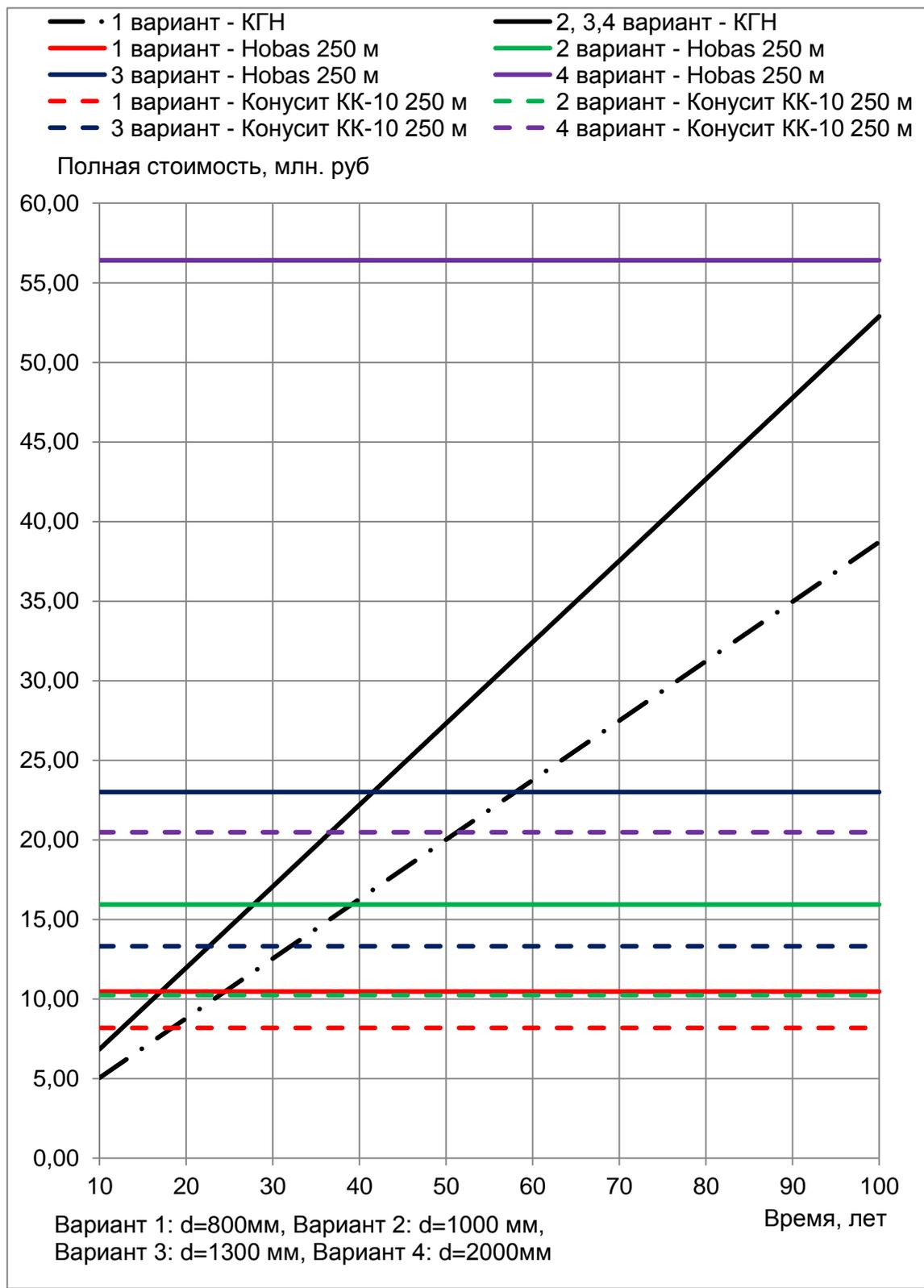


Рисунок 8 – Сравнение стоимости способов защиты канализационного коллектора протяженностью 250 м за различные периоды времени

Из представленных данных следует, что для коллекторов небольшой протяженности способ 1 («КГН – газоочистная установка») может быть использован как временное решение, позволяющее решить проблему коррозии до момента, когда у эксплуатирующей

организации появятся средства на устройство защиты по способам 1 или 2. При этом во всех случаях защита трубопровода по способу 2 (футеровка стеклопластиковыми трубами «Hobas») оказывается более затратной, чем покрытие стенок тоннеля материалом «Конусит КК-10» (способ 3). В тоже время именно способ 2 выступает наиболее надежным из всех рассматриваемых.

На рис. 9 представлено сравнение способов защиты коллектора различной протяженности (от 250 до 2000 м) за 100 лет. Из графика видно, что при определенных значениях протяженности коллектора способ 1 оказывается наиболее выгодным, несмотря на все возможные эксплуатационные расходы. В табл. 5 представлено значение протяженности коллектора, при котором способ 1 оказывается экономически эффективнее способов 2 и 3.

Таблица 5. Протяженность коллектора, при которой способ оказывается менее выгодным, чем использование способа «КГН – газоочистная установка»

Способ защиты Вариант диаметра	Футеровка коллектора трубопроводами «Hobas»	Покрытие стенок тоннеля материалом «Конусит КК-10»
Вариант 1 (d = 800 мм)	915 м	1165 м
Вариант 2 (d = 1000 мм)	835 м	1275 м
Вариант 3 (d = 1300 мм)	585 м	975 м
Вариант 4 (d = 2000 мм)	—	650 м

Из представленных данных видно, что на протяжении 100 лет предлагаемый автором способ для трубопроводов протяженностью в среднем более 1 км оказывается более эффективным. Причем чем больше диаметр коллектора, тем выгоднее становится использовать предлагаемое решение. Однако необходимо отметить, что прогноз на ближайшие 100 лет в условиях постоянно изменяющихся технологий не может быть точным. Поэтому все три рассмотренные варианта защиты могут быть применены, и выбор зависит от конкретных условий. В целом, защита с использованием комплекса «КГН – газоочистная установка» является самым выгодным для большинства случаев, но и наименее опробованным на практике, что может быть препятствием к широкому использованию метода в ближайшем будущем. Применение стеклопластиковых труб для футеровки коллекторов является мероприятием, обеспечивающим полную защиту от коррозии, дающим гарантированный отличный результат. Но данный способ требует наибольших капиталовложений. Среднюю нишу по стоимости занимает покрытие стенок коллектора материалом «Конусит КК-10», однако в данном случае на первый план выходит качество выполнения строительных работ, и в случае нарушения технологии желаемый результат не будет получен. Кроме того, в данном случае не гарантируется служба в течение 100 лет.

В заключение необходимо отметить, что предлагаемый авторами способ аэрации сточной жидкости позволяет решить проблему коррозии в коллекторе за камерой гашения напора, однако сама камера гашения напора нуждается в защите, и в данном случае лучше всего использовать футеровку ее поверхности полиэтиленовыми листами или покрытие поверхности бетона составом «Конусит КК-10».

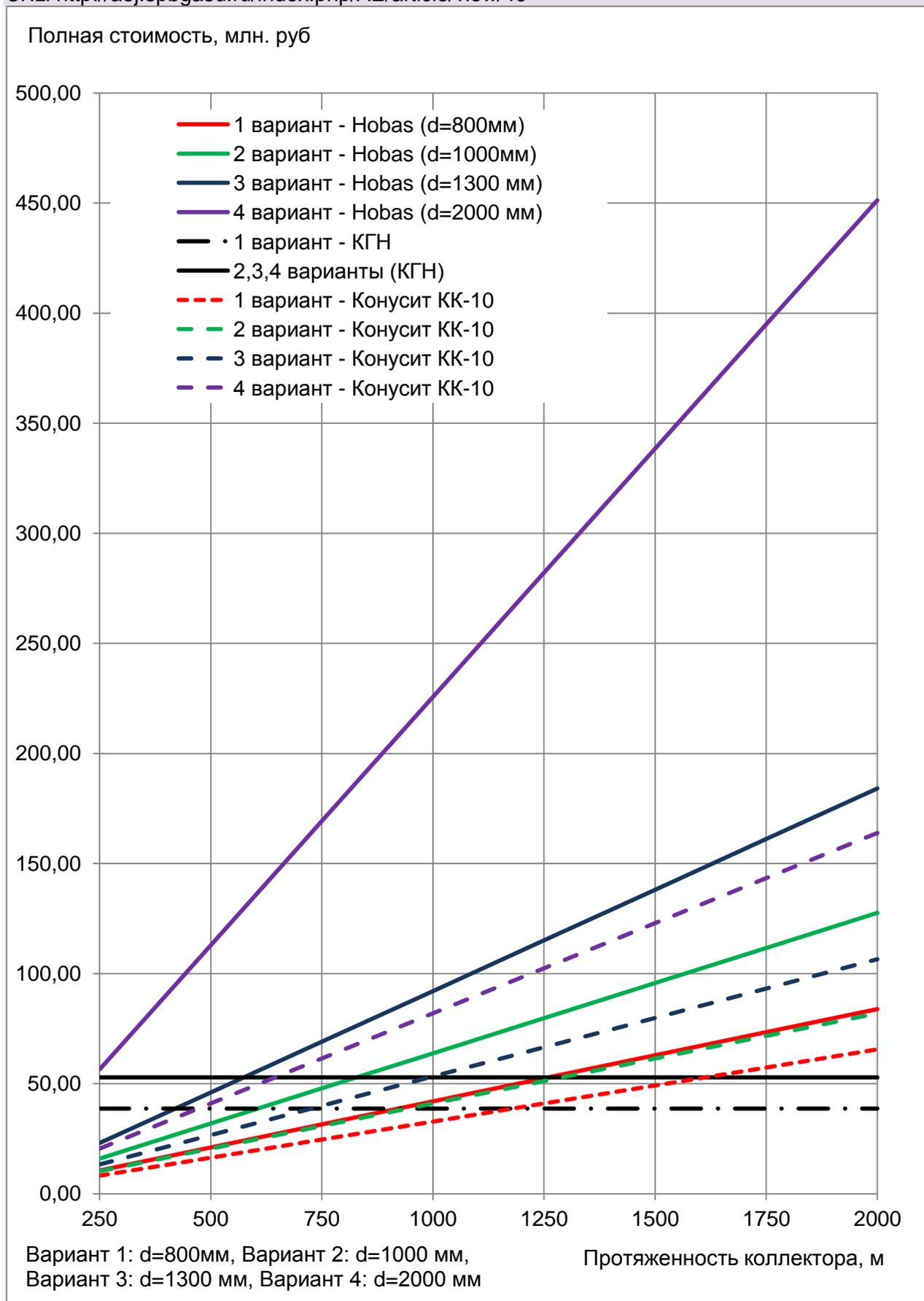


Рисунок 6 – Сравнение способов защиты канализационного коллектора различной протяженности за 100 лет

## Выводы

Микробиологическая (газовая) коррозия является серьезной проблемой как для российской, так и для мировой инженерной инфраструктуры.

Проведенные авторами работы по обследованию канализационных сооружений (тоннелей глубокого заложения и шахт) в г. Санкт-Петербурге показали, что футеровка коллекторов стеклопластиковыми трубами является эффективным методом защиты от коррозии.

Эксперимент, проведенный авторами в камере гашения напора в г. Новосибирске, показал, что также эффективным методом защиты канализационных коллекторов и сооружений на них может быть использование полимерсиликатного состава «Конусит КК-10».

Авторами предложен новый альтернативный метод борьбы с коррозией, основанный на аэрации сточной жидкости в камере гашения напора и доказана его эффективность.

Представлено инженерное решение по защите канализационных коллекторов от процесса микробиологической (газовой) коррозии: комплекс «КГН - газоочистная установка».

Проведено экономическое сравнение способов защиты коллектора и доказана экономическая эффективность применения комплекса «Камера гашения напора — газоочистная установка» для трубопроводов небольшой протяженности на период времени 20–40 лет, как временное решение, и на период 100 лет — как постоянное решение для трубопроводов большей протяженности (более 1 км).

## Литература

Zhang L, De Schryver P, De Gusseme B, Verstraete W (2008) Chemical and biological technologies for hydrogen sulphide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42: 1–12.

Wells P, Melchers R (2009) Factors involved in the long term corrosion of concrete sewers (Paper 54). In *Conference Proceedings: Corrosion and Prevention 2009: The Management of Infrastructure Deterioration*. Coffs Harbour, Australia, pp. 15–18.

Розенталь Н (2011) Коррозия и защита бетонных и железобетонных конструкций сооружений очистки сточных вод. *Бетон и железобетон. Оборудование, материалы, технология*, 1: 96–103;

Hewayde E, Nehdi M (2006) Effect of geopolymer cement on microstructure, compressive strength and sulphuric acid resistance of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58(5): 321–331.

Васильев В с соавт. (2013) Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии. *Водоснабжение и санитарная техника*, 9: 67–76

Васильев В с соавт. (2015) Методы антикоррозионной защиты тоннельных коллекторов и сооружений на них. *Водоснабжение и санитарная техника*, 1: 202–210.

Дрозд Г (2013) Коррозионное разрушение, прогнозирование степени агрессивности эксплуатационной среды и обеспечение надежности канализационных коллекторов на стадии проектирования. *Вода и экология: проблемы и решения*, 1: 40–58.

Tanaka N, Hvitved-Jacobsen T, Ochi T, Sato N (2000) Aerobic–anaerobic microbial wastewater transformations and reaeration in an air-injected pressure sewer. *Water Environment Research*, 72(6): 65–674.

Столбихин Ю (2015) Исследование процесса эжекции воздуха в камере гашения напора. *Вестник гражданских инженеров*, 3(50): 202–210.

Столбихин Ю (2016). Разработка методов предотвращения коррозии канализационных коллекторов и сооружений на основе совершенствования камер гашения напора. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук, СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Россия

Статья опубликована в электронном журнале Architecture and Engineering

Ссылаться на: Vasiliev V, Stolbikhi I (2016) A new method for protection of sewage collectors against corrosion, *Architecture and Engineering*, 1(2) :58–67

URL: <http://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/49>

ГН 2.1.6.695-98 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

George RP, Vinita Vishwakarma, Samal SS, Kamachi Mudali U (2012) Current understanding and Future Approaches for Controlling Microbially Influenced Concrete Corrosion: *A Review. Concrete research letters*, 3(3): 491–506

Lynne SN, Grubb BP, Welle TJ, Hausauer JA (2009) Case Study – Fargo, North Dakota: Hydrogen Peroxide for Regeneration of Ferrous Chloride, an Innovative Approach to Hydrogen Sulfide Control. Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2009: Session 21 through Session 30, pp. 1119–1131.

Zhang L, Keller J, Yuan Z, (2009) Inhibition of sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms by ferric iron dosing. *Water Research*, 43(17): 4123–4132.

## ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА ТРАДИЦИОННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ КИТАЙСКОЙ ПРОВИНЦИИ ГУЙЧЖОУ

Сюй Вэй<sup>1</sup>, Светозар Павлович Заварихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

E-mail: [xuweiba@163.com](mailto:xuweiba@163.com)

<sup>2</sup>Доктор архитектуры, профессор, профессор кафедры истории и теории архитектуры Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

E-mail: [z-svetozar@mail.ru](mailto:z-svetozar@mail.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются типы планировочных структур горных поселений южного Китая. Составлена типология фрагментов горного ландшафта и выявлена зависимость планировки и типов поселений от характера конкретного ландшафта. К основным типам планировочных структур поселений отнесены кустовые, лентообразные, линейные, ветвящиеся и групповые. Охарактеризованы общественные зоны поселений.

### Ключевые слова

горные поселения, горный рельеф, планировочные структуры, общественные зоны

### Введение

Историко-архитектурная и ландшафтно-пространственная специфика сельских поселений — настоящий стержень истории китайской нации, наглядно демонстрирующий устойчивость идеалов, трудолюбие и житейскую мудрость народа. Традиционная среда жизнедеятельности исторических поселений до сих пор обладает непреходящим культурным обаянием и жизненной силой формотворчества. Особенно наглядно и выразительно влияние природного контекста на архитектурно-планировочные характеристики среды жизнедеятельности проявляются в условиях горных поселений, в частности поселений провинции Гуйчжоу, архитектурно-планировочная специфика которых до сих пор остается малоизученным феноменом. Между тем, физическая сохранность этих поселений в условиях современного строительства, влияния глобализации и активного оттока капитала из регионов в центр, находится на грани исчезновения. Поэтому в последние годы государство приступило к разработке программ развития туризма и управления строительством на территории исторической среды жизнедеятельности. Все отмеченные обстоятельства придают особую актуальность исследованиям, посвященным архитектурно-пространственной специфике традиционных поселений в горных районах Китая.

Целенаправленное (хотя и выборочное) изучение архитектуры поселений в провинции Гуйчжоу началось в 1940-х годах. Наибольшую известность тогда получило исследование архитектора Дай Исюань, посвящённое архитектуре традиционного жилища в провинциях Гуанси, Гуйчжоу и Юньнань. Однако впоследствии из-за экономического кризиса исследования исторической среды жизнедеятельности ограничивались их элементами («барабанные» башни, мосты, «хижины на деревьях» и пр.). Свой вклад здесь внесли Дэн Янь, Ху Гуанхуа (Ху Гуанхуа, Янг Зухуа, 2007), Ло Дэци (Ло Дэци 1983), Ли Сянькуй, Ши Жопин, Ши Тинцзан.

В 1990-х годах в Китае начался этап аналитического обобщения накопленного эмпирического материала по историческим поселениям, в том числе и расположенным в провинции Гуйчжоу. Весомый вклад здесь внесли Тан Гоань, Пэн Лиго,

Ву ЧжэнГуан, Чжоу Хунцань, Ван Цицзюнь, Сы Синьчжи, Ли Сянькуй, Цзинь Юй, Ло Дэци, Ли Юйсян, Гуань Яньбо Гуань Яньбо (1997) и др.

В XXI веке продолжается изучение таких аспектов традиционной архитектуры как «среда и ландшафт», «сохранение, реконструкция и развитие традиционной среды жизнедеятельности». Эти проблемы рассматривались в работах Ли Чжиин, Чэн Янь, Цай Линь, Ван Юань, Гу Цзин, Сунь Вэй (2005), Чжан Илун, Юй Яфан, Лун Юйцзе, Ли Цэнлай, Чжао Син, Лю Сэньлинь, Ву Чжэнгуань, Сяомэй Ван, Лэ Лэцзюнь.

Однако до настоящего времени подробному исследованию подвергались лишь отдельные аспекты традиционного зодчества провинции Гуйчжоу, такие как архитектура башен, склепов и храмов. Никогда не рассматривались исторические поселения в регионе как система типологически определенных архитектурно-пространственных композиций, зависящих от природного контекста. Планировочные структуры таких поселений (в том числе в их зависимости от рельефа) никогда не были предметом целенаправленного и последовательного изучения.

### **Задачи**

В связи с указанным, в настоящей статье поставлена задача выявить зависимость архитектурно-планировочных характеристик среды жизнедеятельности от ландшафтно-топографических особенностей местности. Для решения этой основной задачи поставлены конкретные задачи выявления типов горного рельефа, пригодного для застройки, и соответствующих им типов поселений.

### **Предмет исследования**

Предметом исследования является характер и линии влияния ландшафтно-климатических факторов на архитектурно-планировочную специфику среды жизнедеятельности в горных районах китайской провинции Гуйчжоу.

### **Методы**

В статье использованы:

- комплексное и взаимосвязанное изучение литературных и картографических материалов, и данных натурных авторских обследований;
- проблемно-логический метод анализа материалов с целью выявления типологической зависимости планировочных структур исторической среды жизнедеятельности от рельефа участка.

### **Основная часть**

Высокогорные районы современной провинции Гуйчжоу, расположенной на юго-западе Китая, начали обживаться еще в эпоху неолита (археологи обнаружили на территории более двухсот пещерных городищ). Чаще всего древние поселения занимали участки вдоль рек и на горных равнинах. Около пяти тысяч лет назад там стали возникать аграрные родовые общины, не являвшиеся носителями китайской культуры. Активное заселение представителями ханьской (китайской) национальности началось в период правления династии Мин (1368–1644). Соответственно в этом горном регионе начался процесс формирования системы китайских поселений, соседствующих с поселениями национальных меньшинств.

Общими топографическими особенностями горных районов Южного Китая является наличие склонов, обращенных на все стороны света, и большой перепад высот (разница между самой низкой и самой высокой точкой в западной части региона составляет 2 км.) (Алексеев, Ковалев, Ткаченко, 1991). На характер ландшафта влияют карстовые и ледниковые очертания, почти три тысячи небольших рек с притоками, а также относительно крупные главные реки Дулюцзян, Циншуй и Вуянхэ, которые текут почти параллельно друг-другу с запада на восток, в соответствии с общим понижением рельефа. Там, в восточной части региона, из-за повышенной влажности всегда росли леса (Rapoport, 1987).

Ландшафтно-географические и климатические особенности региона обусловили локальность миграционных потоков при заселении региона и его относительную

изолированность от процесса исторического развития Китая. Все это создавало условия для длительного бытования национальных культур, включая их архитектурно-градостроительные аспекты, которые в свою очередь самым непосредственным образом зависели от характера конкретных ландшафтов. (Akira Fujii, 2003)

Разнообразие природных условий стало причиной разнообразия планировочных структур поселений. На выбор участка для поселения влияли общий уклон местности, характер окружающих горных склонов, наличие реки, господствующее направление ветра, наличие пахотной земли, возможность территориального развития застройки, ориентация «фонового» склона (дома обычно примыкали к северному склону, чтобы максимально использовать солнечное тепло и свет). Поселения не возникали на берегу рек с быстрым течением или там, где река могла легко выйти из берегов. На выбор участка влияла также его высота над уровнем моря. Обычно, чем выше расположено поселение, тем меньше были плотность и общая площадь застройки.

Классический тип горного поселения – это поселение, расположенное в монорельефном месте, например, на склоне горы, у ее подножия, или на вершине. В зависимости от конкретного местоположения все поселения региона разделены на приречные, склоновые, вершинные, поселения в ущелье и поселения на комбинированном рельефе. Исследование показало, что поселения на склонах гор составляют более 40% всех поселений региона, 22 % поселений расположено в долинах рек, 14% – у подножия гор, 8% – на вершинах, 14% – на комбинированном рельефе (Ван Дэжуа; 2012)

Приречные поселения являются наиболее распространенными. При этом конкретное место выбиралось вблизи горного хребта, что обеспечивало необходимую защиту от холодных ветров. Поэтому такие поселения обычно вытягивались лентой вдоль реки и вдоль горного хребта, иногда формируя цепочку из нескольких десятков деревень. Чаще всего осваивался один берег, но бывали случаи застройки обоих берегов.

В тех случаях, когда поселение располагалось в излучине реки, осваивалась не только узкая прибрежная полоса, но и площадки, удаленные от воды. Другая ландшафтная ситуация возникала по обоим берегам устья притока реки (в горных районах река часто имеет большое количество близко расположенных притоков). В таком случае поселение формировалось не линейным, а компактным массивом.

Поселения в ущелье формировались при пахотных землях, притягивавших к себе аграрное население. Поэтому здесь формировались старейшие рынки.

Склоновые поселения возникали обычно на большой высоте от подошвы горы. Здесь жили в основном народности Мяо и Яо (Ся Фэй, 2009). Внизу, как правило, лежали пахотные земли и протекала река. Возникновение некоторых поселений в этой группе было связано с сезоном дождей. Другие располагались на естественных террасах, которые давали возможность постоянного роста селитьбы.

Вершинные поселения располагались на гребнях гор, или на плато, если они представляли собой относительно ровную поверхность. Подобные поселения были свободны от опасности камнепадов, схода лавин и обладали фортификационными преимуществами. (Новикова, Пустоцветов, 1988) Кроме того, вершины обычно богаты растительностью и плодородным почвенным покровом. Недостатком такого местоположения является ограниченность участков, пригодных для застройки, и постоянный дефицит воды.

Рельеф	Долины или берега рек	Подножие горы	Склон горы	Вершина горы	Комбинированный рельеф
Тип структуры					
Центрические	 Кустовая Юй Дун	 Дун Ли	 Цю Ли	 Цань Лю	
ПОЛОСОВАЯ	 Линейная Цань Цань	 Гао Сян	 Тао Ань	 Ву Ин	
	 Разветвленная Шу Дун	 Ма Цань	 Гао Лиань	 Цань Ли	 Гоу Дун
Многоцентровые	 Групповая Тай Пань	 Чжан Тоу	 Ся Гу	 И Дун	 Цань Цань

Поселения на комбинированном рельефе формируется в процессе роста застройки, которая постепенно занимает не только береговую зону, но также склоны и даже вершины гор. Это происходит при удачном сочетании нескольких факторов – транспортной доступности, наличия пахотных земель, реки, при пологости склонов. Влияла также близость других поселений, с которыми можно было установить производственную кооперацию.

Организация пространства в горных поселениях на первый взгляд может казаться хаотичной, но на самом деле в ней есть своя логика, так как она аккумулирует многовековой опыт существования в сложных природных условиях. Разнообразие планировочных структур поселений может быть сведено к пяти обобщающим группам, а именно: кустовой, лентообразной, линейной, ветвящейся и групповой.

**Поселения с кустовой планировочной структурой** наиболее древние, возникавшие, как правило, на вершинах гор. В ранний период масштаб строительства жилья здесь был сравнительно невелик, строили очень экономно и воздействие на природу было минимальным. Отношение длины к ширине пятна застройки первоначально не превышало 2:1. (Юань Чжунцзинь, 2007), что позволило в перспективе поселению расширяться во всех направлениях. Формы планов почти всех кустовых структур отличаются компактностью и приближаются к круглой, овальной, квадратной или многоугольной форме.

Кустовые структуры разных поселений не были идентичными друг другу, а формировались в зависимости от характера участка. В высокогорных районах поселения

были небольшими и располагались они, как правило, на горных вершинах или на террасах. Постройки располагались максимально скученно. Поселения, расположенные на склонах, в ходе своего развития испытывали минимальное влияние рельефа местности, но постройки также располагались очень близко друг к другу. По мере расширения поселений их структура нередко приобретала лентообразную форму.

Кустовые поселения, расположенные в долинах и по берегам рек, обычно формировались на ровных участках между горами. Река обычно протекала либо через поселение, либо рядом с ним. В зависимости от размеров ровных участков варьировались размеры и функциональная ориентация поселений от сугубо аграрных до торговых. В региона из таких поселений нередко вырастали небольшие торговые города с более упорядоченной планировочной структурой.

**Поселения с лентообразной планировочной структурой** поначалу были компактно-кустовыми, но в процессе развития в соответствующих ландшафтных условиях вытягивались вдоль реки, дороги, или долины. Постепенно формировалась лентообразная структура, либо её разновидности – пунктирные, полосовые или ветвящиеся («звездчатые») структуры. На гребнях горных хребтов лентообразные поселения возникали редко и были небольшими. Поселения на холмах имели средний размер. Но поселения в бассейнах рек благодаря таким факторам как значительная площадь ровных участков, плодородная почва, доступность водных ресурсов и близость транспортных путей получали преимущество в развитии, поэтому их размер превышал средний размер поселений, перечисленных выше, примерно в два раза (Пэнь Игань, 1994). Ленточные поселения на крутых склонах изначально возникали как группы домов возле важных транспортных путей.

Лентообразная структура поселения формирует соответствующий характер тропо-дорожной сети с одно-двумя «осевыми» магистралями, прорезающими все поселение. Транзитные магистрали за пределами поселения обычно имели ширину 5 – 8 метров, внутрипоселковые дороги и тропы имеют небольшую ширину.

**Поселения с линейной планировочной структурой** развиваются по прямой или ломаной линии. Так же как и линейные они могут образовывать протяжённые «пунктирные» линии. Расположены они, как правило, на склонах гор и в речных бассейнах, на возвышенностях или (редко) в верхних поясах гор. Чаще всего такие поселения вытягиваются вдоль горного хребта или на террасах. Факторами развития здесь являются крутизна склона и доступность транспортного сообщения. Форма поселения обычно повторяет изгибы хребта, вдоль которого оно развивается, но общая структура остается линейной. Такие поселения по большей части являются торговыми. Отдельную типологическую группу составляют параллельные линейные поселения. Но в любом случае линейная структура создает предпосылки для возникновения двух и более общественных центров поселения, а для формирования тропо-дорожной сети с одной осевой дорогой – тупиковой или транзитной.

**Поселения с ветвящейся планировочной структурой** возникали в разветвленных долинах, на дне ущелий или на горных хребтах. Наименее благоприятными для них являются местности со сложным рельефом, а самыми благоприятными – средняя часть горы (Хоу Тяньцзян, 2006) Разветвленные структуры развивались, как правило, из линейных или лучевых структуры путем разветвления от некоторых узловых точек. Можно выделить две разновидности таких поселений: 1) с явным наличием основной ветви и 2) с несколькими равнозначными ветвями. Разветвленная структура нередко формировалась вокруг основной дороги, ведущей к вершине горы, и вдоль ответвлений от этой дороги на участках разной высоты. Дороги и тропы прокладывались, конечно, с максимально рациональным использованием специфики конкретного рельефа. Поэтому дороги могли проходить ниже или выше отдельных домов.

**Поселения с групповой планировочной структурой** возникали в процессе роста и слияния отдельных поселений. Поэтому они имеют крупные размеры. Конкретная планировка зависит от местности, в которой эти поселения располагаются. В отличие от кустовых структур, дома здесь стоят более свободно, на значительном расстоянии друг от друга, что дает больше возможностей приспособить постройку к специфике

конкретного участка. Планировочная специфика таких поселений представлена двумя типами – последовательным и звездчатым. Первый тип формируется путем соединения различных кустовых или лентообразных поселений, которые соединяются одной-двумя дорогами. Второй тип возникает, как правило, в долинах рек, на береговых террасах или на склонах. Этот тип является наиболее распространенным.

**Общественные зоны поселений** – это небольшие площади с барабанными башнями, театральными подмостками и другими постройками, необходимыми для осуществления функций общения, совершения культовых обрядов и пр. Общественные зоны «разрывают» плотную ткань застройки поселений, служат ориентирами, вносят разнообразие в однородное уличное пространство, вызывают чувство единения и безопасности. Количество общественных зон зависит от величины поселения и специфики их планировочных структур. Даже если общественный центр располагается на окраине поселения, это никак не влияет на его значение именно как центра этого поселения (Цзи Фучжэнь, 2008).

Общественные центры могут быть замкнутыми, полужамкнутыми и открытыми. Замкнутые центры представляют собой небольшую площадь, застроенную по периметру примыкающими друг к другу сооружениями и жилыми домами. Доступ к площади обычно возможен лишь по узкой улице. В поселениях на склоне на площадь нередко приходится подниматься на высоту до 15 метров. В других случаях центр с трех сторон может быть ограничен барабанной башней, колодецем, театральными подмостками, жилыми зданиями и склоном горы. При этом замкнутое пространство центра может иметь несколько уровней.

Общественные центры открытого типа не имеют замкнутого периметра, здания и сооружения расположены относительно свободно. В большинстве случаев такие центры расположены на окраине поселения, там, где больше свободного пространства. Пространственными доминантами в этих случаях нередко бывают барабанная башня и театральные подмостки, расположенные напротив друг друга. В структуру центра могут также включаться жертвенник, молельня, галерея, колодец или водоём (Согомонян, 1991)]. Все элементы, формирующие центр, отражают соответствующие аспекты повседневной жизни людей. Можно выделить три типа организации этих элементов – упорядоченный, свободный и органичный (соответствующий рельефу).

Упорядоченная структура центра подчиняется визуально воспринимаемым осям или четким поворотам этих осей. Во втором случае общая картина обзора отличается значительным разнообразием. Упорядоченность объемно-пространственной структуры центра может усиливаться строительством двух барабанных башен (в соответствии с клановой организацией жизни в поселении).

Общественные центры со свободной структурой формируются вокруг многоярусных площадей, откуда открываются разнообразные виды на горы и на поселение.

Органичные структуры общественных центров чаще всего встречаются в поселениях, расположенных на берегах рек, в предгорьях или высоко в горах, так как в таких ситуациях характер застройки вынужденно зависит от

умения максимально полно учесть специфику природного рельефа.

Элементами структуры общественных зон поселений могут служить также хозяйственные постройки, источники, беседки, мосты, большие деревья и др.

## **Заключение**

Сложность горного рельефа обусловила ограниченность миграционных потоков в регионе, что способствовало формированию и сохранению своеобразной национальной культуры и национального самодостойного зодчества. Поселения возникали и развивались естественным путем, осваивая характерные участки горного ландшафта.

Оригинальные и новые элементы в настоящей статье состоят не только в методе графо-аналитического сопоставления типологических моделей рельефа с моделями планировочных структур поселений, но и в самом предмете изучения, не являвшегося до сих пор объектом целенаправленного научного изучения.

## Выводы

- по местоположению горные поселения в провинции Гуйчжоу делятся на приречные, склоновые, вершинные, поселения у подножия горы и на террасах.
- местоположение поселений накладывало свой отпечаток на планировочную структуру поселений, все разнообразие которых может быть сведено к пяти основным типам – кустовому, лентообразному, линейному, ветвящемуся и групповому;
- важнейшей составляющей почти всех поселений являются общественные центры замкнутого, полужамкнутого и открытого типа. Каждый из них может иметь планировочную структуру свободного, упорядоченного или органичного (соответствующего ландшафту) типа.

## Литература

- Akira Fujii (2003) Rural Settlement of Visit. Ling translation. Architecture & Building Press, Beijing, China.
- Rapoport A (1987) House Form and Culture.
- Алексеев АИ, Ковалев СА, Ткаченко АА (1991) География сферы обслуживания: основные понятия и методы. ТГУ, Тверь: 1991.
- Ван Дэхуа (2012) Китайская ландшафт-культура и городское планирование. Изд-во Юго-Восточного ун-та, Нацзин, Китай.
- Гуань Янбо (1997) Аналитический фон и функции урегулирования этнических групп юго-западного Китая. *Национальные исследования*, 6: 29–32.
- Ло Дэци (1983) Архитектура, камень, люди. *Журнал архитектуры*, 11:76-86.
- Новиков ВА, Пустоцветов ГИ (1988) Архитектурная организация сельской среды. Учебное пособие. НГАХА, Новосибирск, СССР.
- Пэнь Игань (1994) Традиционный деревенский ландшафт. КСПИ, Пекин, Китай
- Согомонян НМ (1991) Сельский жилой дом (проектирование, застройка усадьбы)/ Агропромиздат, Москва, РФ.
- Сунь Вэй (2005) Экологический вид. Исследование, характеристика и разработка традиционного поселения городского типа в горных областях на юго-востоке Гуйчжоу. Дис. Магистра архитектуры и гражданского строительства:
- Ся Фэй (2009) Обзор ландшафта береговой линии в традиционных деревенских поселениях народа Дун. Дисс. Магистра народных искусств Кунь Мин, Китай.
- Хоу Тяньцзян (2006) Деревня народа Мяо в Китае — Си цзян.. Изд-во Этническое гуйчжоу, Гуйян, Китай
- Ху Гуанхуа, Янг Зухуа (2007) Гуйчжоу. Древние деревни Чжаосин. Издательство Этническое гуйчжоу, Гуйян, Китай
- Цзи Фучжэнь (2008) Новый взгляд на народную архитектуру. Фучжэнь Цзи. Книжный магазин Хуаншаня
- Юань Чжунцзинь (2007) Стратегия развития китайских населенных пунктов. Изд-во Вго-Восточного ун-та, Нацзин, Китай.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «ОБЛИЦОВОЧНОГО» БЕТОНА ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ**

Антонина Федоровна Юдина<sup>1</sup>, Михаил Юрьевич Пономарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.  
E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru

<sup>2</sup> Аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; мастер СМР ООО «ЕкатеринбургГорСтрой-Гарант» НП «Управление строительства «АТОМСТРОЙКОМПЛЕКС»  
E-mail: ponomarevmih@mail.ru

### **Аннотация**

Рассматривается совершенствование технологии каркасно-монолитного домостроения с применением «облицовочного» («архитектурного») бетона, использование которой позволяет воплотить самые смелые замыслы архитектора непосредственно на строительной площадке, переводит монолитный железобетон в разряд архитектурной лицевой поверхности. рассматриваются перспективы развития технологии в России и в зарубежных странах. Приводятся примеры реализованных в Европейских странах проектов из «облицовочного» бетона. Определяется описание технологии «облицовочного» бетона, понятие «архитектурного» и «самоочищающегося» бетона. Рассматриваются достоинства «облицовочного» бетона, состав, виды, назначение и технические характеристики архитектурного и самоочищающегося бетона. Приводятся факторы, влияющие на результат бетонирования, при использовании данной технологии.

### **Ключевые слова**

технология «облицовочного» бетона, «архитектурный» бетон, «самоочищающийся» бетон

### **Введение**

Современное общество все более и более требует от нас, строителей, возведение по-настоящему уникальных и оригинальных зданий и сооружений. В России принципиально новых технологий строительства, в сущности, не так уж много. Одной из причин малого внедрения технологий, является отсутствие опытных специалистов высокой квалификации. Особенно остро стоит вопрос о нехватке смелых решений архитекторов, тщательных конструктивных расчетов проектировщиков и линейных ИТР, которые воплощают в жизнь идеи, созданные архитектором на бумаге.

В последнее время строительная отрасль России развивается высокими темпами, уделяется внимание возведению уникальных зданий. Это вызвано, прежде всего, выходу России на международный уровень — Олимпийские игры 2014 г., чемпионат мира по футболу 2018 г., а также проведение различных чемпионатов мирового уровня. Возникает необходимость разработки оригинальных проектов, а для их реализации — новые и усовершенствованные технологии производства работ.

В основном инновационные технологии приходят к нам из зарубежных стран, примером одной из таких инновационных технологий можно считать возведение каркасно-монолитных зданий из «облицовочного» бетона. Цель данной технологии — строительство не только

индивидуальных зданий и сооружений, но и создание новой визитной карточки целого города, подчеркивая его исключительную архитектурную выразительность.

Изучая опыт разных стран в области монолитного строительства, можно сделать вывод, что технология возведения зданий и сооружений из «облицовочного» бетона все чаще находит свое применение.

При помощи данной технологии возводят здания и сооружения различных категорий, от зданий жилищного назначения, до уникальных сооружений специального назначения. Примеры по их реализации приведены в конце статьи.

Описание облицовочного бетона не всегда носит однозначный характер, и в существующих нормативных документах имеются различные определения. В принципе, под облицовочным бетоном понимаются элементы строительной конструкции, которые после завершения строительства остаются на виду.

*Объекты из лицевого бетона* — это современные сооружения, построенные по уникальным проектам, с возможностью свободного выбора архитектурной формы и способов отделки лицевой поверхности. Подготовка и реализация проектов с применением лицевого бетона требует особого опыта в вопросах калькуляции и проектирования, а также специальных навыков при сооружении данных объектов.

Облицовочный бетон часто определяют как открытый для глаз бетон. Это дает много возможностей для различной интерпретации. Поскольку в России в настоящее время нет никаких норм по исполнению отделки архитектурного бетона, все детали процесса необходимо включать в техническую документацию договора. (Shilstone, 1985)

В России, исследованию и применению технологии «облицовочного» бетона уделяется небольшое значение. Тем не менее в настоящее время внедряется благодаря проекту архитектурного бюро Foster+\_Partners., которое отличается смелостью архитектурных решений. Вопреки обыденному суждению российских строителей Норманн Фостер предложил перевести монолитный железобетон в разряд архитектурной лицевой поверхности. Проект разработан по заказу Русской медной компании (РМК) в Екатеринбурге. Неудивительно, что основой для разработки архитектурного облика здания стала структура кристаллической решетки меди. Также в дизайне здания предложено использовать и цвет самой меди. По мнению директора по связям с общественностью и социальной политике РМК Евгения Чаплыгина, будущая штаб-квартира РМК будет привлекать внимание и вносить особый шарм в городскую застройку Екатеринбурга, как это происходит в других крупнейших городах мира (Гусев (ред.); 2014).

С конструктивной точки зрения, здание представляет собой каркасно-монолитную систему, основными элементами которой являются несущие колонны, высотой от 5 до 11 м. и плиты перекрытия. Материалом, из которого изготавливаются конструктивные элементы здания, является «белый» (облицовочный) бетон.

Практическая реализация проекта по настоящему уникального здания, изучение и исследование инновационной технологии «облицовочного» бетона осуществляется строительной компанией ООО «ЕГС-Гарант» НП «Управление строительства «АТОМСТРОЙКОМПЛЕКС». Вопросы, возникающих в процессе строительства указанного объекта множество и, до настоящего времени, окончательного решения по реализации данной технологии не выявлено.

Основные требования к объектам из облицовочного бетона:

- подчеркнуть уникальность и своеобразие сооружения.
- обеспечить целесообразность и полезное использование сооружения
- свободный выбор оформления лицевых поверхностей (шаг модульной сетки, швы и текстура);
- поддержка разработки проектов по возведению уникальных зданий и сооружений, свободный выбор выразительных форм и их оформления. Именно в этом смысле монолитный бетон дает определенную свободу выбора архитектурных форм и выполнение этих требований.

## Материалы и методы

«Облицовочный» (Архитектурный) бетон (лат. *Architectura* от др.-греч. ἀρχι — старший, главный и др.-греч. τέκτων — строитель; фр. *Béton*, от лат. *bitumen* — минеральная смола, асфальт) — строительная смесь на основе цементно-песчаного состава с различными минеральными и неорганическими добавками. Архитектурный бетон несет как опорную и конструктивную нагрузку, так и выполняет декоративно прикладную задачу, имеющую художественную и эстетическую ценность (см. <http://estetiks.ru>).

Словосочетания: «облицовочный» бетон, «белый» бетон, «полимер бетон», «акрил бетон», «арт бетон», «художественный бетон», «декоративный бетон», являются синонимами понятия архитектурный бетон. Термин «архитектурный бетон» сформировался в профессиональной среде архитекторов для обозначения строительного материала, из которого можно создавать законченные архитектурные объекты (Некрасова, Некрасов, Садикова, 2008).

### Виды и назначение архитектурного бетона

Архитектурный бетон — высокотехнологичный строительный материал, открывающий большой спектр возможностей. Существует три основных направления применения бетона: для создания конструкций, объектов и оснований (монолитных, железобетонных и др.); использование бетона в декоративных целях, как материала для отделки уже готовых поверхностей; создание объемных художественных объектов — третье направление объединяет конструктивные и декоративные свойства архитектурного бетона: форма объединена, по сути, с текстурой и фактурой (Федеральный закон 169-ФЗ. Об архитектурной деятельности в Российской Федерации).

В зависимости от последующего назначения, можно изменять состав смеси, для того чтобы получить бетон с конструктивными или декоративными свойствами:

*геометрический бетон* — бетон, в котором преобладают конструктивные свойства, для создания монолитных сооружений разных конфигураций с применением разных видов опалубки;

*декоративный бетон* — бетон, в котором преобладают декоративные свойства смеси: бетон, используемый для отделки и декорирования готовых поверхностей;

Бетон, с преобладанием геометрических свойств, как уже рассматривалось выше, нашел широкое применение в Германии, как материал решающий многие задачи строительной физики (см. <http://www.beton.org/>). Применяется в строительстве современных зданий, облицовке и создании новых фасадов, внутренней отделки и изменении формы помещений (Шильд, 1982). Долговечность бетонных конструкций, высокопрочные структурные характеристики, разнообразные возможности конфигурации сделали архитектурный бетон наиболее востребованным материалом для возведения больших строительных объектов разнообразных геометрических форм, отливаемых при помощи опалубки (Корчагина, 2004).

Декоративный (архитектурный) бетон существует наряду с бетоном уже более 100 лет и с успехом заменяет естественный камень, гипс, шамот. Из архитектурного бетона в настоящий момент выпускают любые виды изделий, как тротуарные плиты, так и многометровые монументальные скульптуры, цветное исполнение которых практически неограниченно.

### Состав архитектурного бетона

В зависимости от поставленных задач, состав бетонной смеси можно менять благодаря применению различных добавок, которые либо увеличивают конструктивные свойства (устойчивость, прочность, гидрофобность и др.) либо улучшают декоративные качества (фактура, текстура).

Для изменения фактуры и текстуры архитектурного бетона в состав смеси могут входить такие составляющие — граниты, мраморы, базальт, кварциты, слюда, частицы скальных пород.

Для получения цветных бетонов применяют белые, цветные пигменты. Наиболее часто используют минеральные пигменты, которые в большинстве своем являются оксидами или солями различных металлов. Есть различные органические пигменты и красители, которые дают

интенсивное окрашивание бетона при малом количестве введения. Для получения равномерной окраски бетона используют специальные добавки-выравниватели.

### *Технические характеристики архитектурного бетона*

Помимо своей уникальности следует отметить и другие положительные свойства:

1. технические характеристики облицовочного бетона в несколько раз превосходит свойства обычного бетона, что достигается путем специального способа укладки связующего раствора и применением специальных добавок (модификаторов и пластификаторов);
2. устойчивость к воздействию агрессивных сред (атмосферные осадки, перепад температур – 50 °С до + 50 °С и т.д.);
3. поверхность не требует последующей отделки, что в свою очередь выражается на показателе экономического эффекта;
4. имеет собственную фактуру, что широко используют в своих идеях архитекторы и дизайнеры в стиле «hi-tech»;
5. легко моется;
6. не выцветает;
7. обладает высокой устойчивостью к ультрафиолетовым лучам.
8. высокая сопротивляемость давлению и истиранию;
9. высокая противоударная прочность;
10. высокая сопротивляемость проникновению хлоридов;
11. высокая газонепроницаемость;
12. регулируемые показатели деформативности, в том числе компенсация усадки архитектурного бетона в возрасте 14–28 суток естественного твердения;
13. сравнительно небольшой удельный вес (не оказывает большой нагрузки на фундаменты);
14. хороший коэффициент звукопоглощения;
15. пожаробезопасный материал;
16. экологический материал;

Таблица 1. *Технические характеристики объектов, изготовленных из архитектурного бетона*

№	Наименование показателей изделий	Ед.изм.	По требованиям ГОСТ 1760891	По факту
1	Класс (марочность) изделий: по прочности на сжатие	кг/см <sup>2</sup>	B22,5-B30 (300–450)	B30 min 450
2	Класс по морозостойкости (в солях)	—	F 200	F 350
3	Водопоглощение	%	5	4,4
4	Истираемость (ГОСТ 13015.0)	г/см <sup>3</sup>	0,9–0,7	0,2–0,3
5	Отклонение геометрических параметров: длина, ширина, толщина	мм	+ 5 + 5	+ 1 + 1
6	Цементно-водное отношение (ц/в)	%	45	17
7	Категория лицевой поверхности	—	КПЕ-КПЗ	КП1
8	Прочность через сутки в процессе естественного твердения	МПа		25–30

Совмещая свойства геометрического и декоративного бетона можно варьировать конфигурацией и оформлением здания. Тем не менее в Европейских странах продолжают выявлять дополнительные возможности монолитного домостроения, изменяя состав бетона и совершенствуя технологию бетонирования.

В Германии в настоящее время предпринимаются значительные усилия для разработки самоочищающихся монолитных поверхностей, либо поверхностей, которые будут легко подвергаться чистке. Можно отметить, что для определенных фасадов уже есть ранние разработки в этом направлении. Данные поверхности получили название *самоочищающегося бетона* (Cassar, 2004).

Для того чтобы получить самоочищающуюся поверхность, в основном существуют два подхода:

1. поверхность должна быть высоко-водоотталкивающей (супергидрофобная поверхность)
2. поверхность должна обладать высокой гигроскопичностью, т.е. собирать воду (супергидрофильная поверхность). В сочетании с тем, что фасад здания имеет утолщение, напоминающее по своей геометрической форме поверхности листьев, позволяющей грязи не задерживаться на фасаде и легко стекать вместе с каплями дождя. В связи с этим, такую форму так и называют "эффектом лотоса".

#### *Супергидрофобные поверхности*

Для достижения сильного водоотталкивающего эффекта, материал модифицирован или покрыт силиконовой смолой или тетрафторэтиленом — капли воды могут легко и полностью стекать с поверхности. Однако, проблема возникает в том, что слишком маленькие капли не могут полностью соскальзывать и остаются вместе с загрязняющими частицами (пылью), засыхают, образуя местами темные фрагменты.

#### *Супер Гидрофильные поверхности*

Супер Гидрофильные поверхности, в связи с этим, являются более интересной альтернативой. Они имеют тонкую микрошероховатую структуру, частицы грязи больше, чем микроскопические частицы на поверхности материала, поэтому все частички грязи оседают на "кончиках" этих частиц. Таким образом, частицы грязи имеют очень низкую адгезию и легко стекают вместе с каплями воды.

Поверхность модифицируется путем использования фотохимических катализаторов. Эти химические вещества начинают действовать под воздействием света (ультрафиолетовых лучей) и оказывая на загрязняющие частицы разрушительное воздействие, тем самым очищая поверхность.

В качестве катализатора выступает диоксид титана, который при облучении ультрафиолетом (солнечными лучами) разлагает многие вредные вещества (например — окиси азота), а также уничтожает бактерии (Cassar, 2008).

Кроме того, для бетонных конструкций используют  $TiO_2$  потому, что это химический элемент слабо взаимодействует в щелочной среде бетона и не виден на поверхности.

Для нанесения на бетонную поверхность используют следующие методы:

Распыление раствора  $TiO_2$  на поверхность;

Погружение железобетонного элемента в специальную ванну с раствором  $TiO_2$ ;

Создание слоя с помощью геля, наносимого непосредственно на поверхность.

Указанные методы имеют единственный недостаток — низкая стойкость к механическим воздействиям. В связи с этим в настоящее время пытаются включить фотохимический катализатор в состав бетонной смеси. В этом случае при повреждении или износе верхнего слоя и основного материала, внутренний слой также содержит  $TiO_2$  и функция самоочистки сохраняется.

Исследования в данной области оказались возможными с развитием нано технологий, так как каталитические свойства диоксида титана проявляются наиболее активно, только когда он нанесён очень тонким слоем, или в виде микроскопических частиц.

Шведы полагают, что пришла пора активного внедрения этого фотокатализатора в городское строительство, и намерены продвинуть исследования в данной области, а главное — серийно выпускать такие стройматериалы и бетонные смеси в частности.

Несмотря на более высокую цену, а также — на невыгодное соотношение между огромными массами воздуха и сравнительно небольшими площадями, покрытыми катализатором — первые опыты показали: эффект от таких стен всё же есть.

Особенно заманчивым выглядит постройка из бетона, очищающего воздух, автомобильных туннелей.

Первый производственный опыт строительства, с использованием фотохимических катализаторов, была проведена в США и Японии, но в основном для керамических строительных материалов, таких как плитка. В Италии, самоочищающийся бетон вывели на более высокий уровень: в 2003 году были построены Церковь "Богатый Милосердием" в Риме (фото 1). Проект был создан американским архитектором Ричардом Мейером.



Фото1. Церковь из самоочищающегося бетона, всегда сохраняющего белизну фасада., «Богатый милосердием» Dives in Misericordia, Рим.

Следует отметить, что никакое строительство из любого инновационного материала нельзя представить без совершенствования технологии строительного производства. Любое улучшение физических или химических свойств бетонной смеси, влечет за собой изменение методов бетонирования.

### *Методы и технология изготовления конструкций из облицовочного бетона*

Вся работа с «архитектурным» бетоном до настоящего времени проводилась в основном в заводских условиях с определенным ограниченным количеством формообразователей. В построечных условиях производство железобетонных монолитных конструкций с использованием такого бетона практически не выполнялось. Данный факт в основном касается так называемого декоративного бетона.

В наших исследованиях предлагается больше внимания уделить геометрическому бетону и исполнению проектов по возведению каркасно-монолитных зданий, в которых несущие конструкции выполнены из облицовочного бетона.

Нужно обязательно учитывать, что помимо функциональности и организации пространства в ходе реализации строительного проекта с применением лицевого бетона решающее значение, прежде всего, имеют лицевые поверхности и их внешний вид. Они берут на себя функцию архитектурного оформления, и поэтому такие лицевые поверхности имеют еще одно название: „Бетонные поверхности с высокими требованиями к внешнему виду“. В августе 2004 года «Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein E.V.» (DBV) и «Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V.» (BDZ) опубликовали третье после 1977 и 1997 года издание Правил по использованию «архитектурного бетона». Впервые определены четыре класса от SB 1 до SB 4, которые различаются по требованиям к текстуре, пористости, равномерности цвета, по ровности и по качеству стыков между конструктивными элементами и стыков опалубки (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV) Bundesverband der Deutschen

Zementindustrie (BDZ), 2015). Другие требования относятся к проверке поверхности. В основной части даны комментарии относительно процедуры проектирования и тендера и об их реализации. В основу положен опыт строительства значительных сооружений из архитектурного бетона последних лет. В последней части обсуждается оценка поверхности архитектурного бетона. Основным принцип в том, что первым и определяющим критерием является общее впечатление. (Litzner and Goldammer, 2005).

Указанный своду правил и стандартов не только устанавливает соответствующие категории согласно выдвигаемым требованиям, но и определяет те меры, которые необходимо применять на этапе исполнения работ. В нем также даётся обзор методов проектирования и исполнительных работ. Особый акцент ставится на улучшении результатов, которые могут быть достигнуты с использованием белого цемента. (Heess, 2009).

К опалубке для лицевого бетона предъявляются особые требования по качеству, и для нее также необходимо учитывать особые стоимостные факторы. Для того чтобы лицевые поверхности соответствовали представлениям архитектора и заказчика, перед началом строительства необходимо, по нашему мнению, продумать необходимые рабочие операции, их последовательность и сроки с точки зрения всех участников проекта, отвечающих за качество бетона. Предлагается определенная система регулирования, позволяющая учесть все факторы, влияющие на результат.

1. Наличие согласованной или, соответственно, утвержденной проектной документации, желательно на электронных носителях;
2. По возможности, наличие исходных чертежей здания до начала отделочных работ (с изображением только несущих стен и перекрытий);
3. Точные указания, какие именно поверхности должны быть отделаны облицовочным бетоном;
4. Определение схемы расстановки опалубки;
5. Согласование маркировочных чертежей (с планами и разрезами) сложных участков лицевых поверхностей (в зонах стыков со стенами и перекрытиями);
6. Учет закладных деталей, которые могут повлиять на вид лицевых поверхностей (освещение, трубы и т.д.);
7. Определение расположения рабочих швов по согласованию со специалистом по расчету прочности;
8. Проведение бесед со всеми, кто участвует в сооружении и отделке лицевых поверхностей на данном объекте;
9. Выяснение, какие требования к поверхности связаны с низкими трудозатратами, а какие — с высокими;
10. Принятие мер для защиты готовых элементов из облицовочного бетона в ходе дальнейших строительных работ;
11. Необходимость создания точной геометрической формы опалубки;
12. Ровная поверхность лицевой части опалубки, соприкасающаяся с бетоном, без царапин, сколов и трещин, пусть даже малейших;

В процессе создания готовой продукции принимают участие целый ряд специалистов и участников строительства, в частности: архитекторы, проектировщики, бетонные заводы, специалисты опалубочных систем, линейные ИТР.

Четкое распределение сфер ответственности в ходе работ с облицовочным бетоном при возведении каркасно-монолитных зданий — это важная составляющая успеха. Облицовочный бетон — это результат работы в команде.

Особенностям формирования облицовочных поверхностей и методам заливки бетонной смеси следует посвятить отдельную статью.

## Реализованные проекты из «облицовочного» бетона

### Жилой дом на Петрисберг



#### *Место:*

Трир, Германия

#### *Производство строительно-монтажных работ:*

Josef Schmitz GmbH, Грослитген

#### *Архитектор:*

Denzer & Poensgen, Кёльн

#### *Опалубка:*

Балочная опалубка Top 50

#### *Палуба:*

Многослойная плита с пленочным покрытием

#### *Особенность:*

Сетка швов и анкеров с заданным шагом. Совместно с заказчиком архитектурное бюро Denzer & Poensgen из Кёльна разработало необычную концепцию организации жилого пространства: здание с жилой площадью ок. 470 м<sup>2</sup> на 3 уровнях, отделанное с максимальным использованием облицовочного бетона, соответствует историческим традициям римской архитектуры, которые в Трире присутствуют везде. Четкая структура пространства с дорожками, свободными площадками, переходами, внутренними и внешними помещениями создает неповторимое впечатление. Возникает подобие небольшого города: внешне довольно скромное здание удивляет обитателей и гостей внутренним архитектурным обликом — вплоть до атриума в виде оазиса с маленьким водоемом и садом.

*Экспериментальный жилой комплекс Хадерсдорф, дом 6*



*Место*

Вена, Австрия

*Производство строительно-монтажных работ*

Strabag, Вена

*Архитектор*

Роджер Динер, Базель

*Опалубка*

Балочная опалубка FF20

*Палуба*

Конструктивная плита 3-SO

*Особенность*

Конструктивная плита крепится к опалубке FF20 со стороны, не обращенной к бетону, анкерные крепления и точки подвеса для подмостей располагаются с заданным шагом.

Архитектурное бюро Krischanitz построило на участке площадью 8.000 м<sup>2</sup> на окраине Вены экспериментальный жилой комплекс, состоящий из 10 жилых домов. Для участия в разработке проекта были приглашены 9 известных архитекторов из Австрии, Германии и Швейцарии. По условиям проекта, в качестве конструкционного материала должен был применяться исключительно бетон — чтобы продемонстрировать многообразие форм этого материала.

*Жилой дом Han Bit*



*Место*

Цюрих, Швейцария

*Производство строительно-монтажных работ*

Toneatti AG, Йона

*Архитектор*

Архитектурное бюро

Burkhalter Sumi, Цюрих

*Опалубка*

Балочная опалубка Top 50

*Палуба*

Деревянная доска

Жилой комплекс „Han Bit“ в Херрлиберге состоит из трех жилых домов. Все фасадные поверхности сделаны из облицовочного бетона. Для облицовочного бетона использовались предварительно собранные элементы балочной опалубки, на которых монтировались панели из пиленых досок. По требованию архитектора доски обновлялись после каждого цикла бетонирования.

*Аптека, г. Эбенталь*



*Место:*

Эбенталь, Австрия

*Производство строительно-монтажных работ*

OVEN Bau, Каринтия

*Архитектор*

Бюро Trecolore Architects

(Архитектурное бюро

Dorn Ziviltechniker GmbH,

Анненхайм)

*Опалубка*

Рамная опалубка Framax

Круговая опалубка H20

*Палуба*

Многослойная плита с

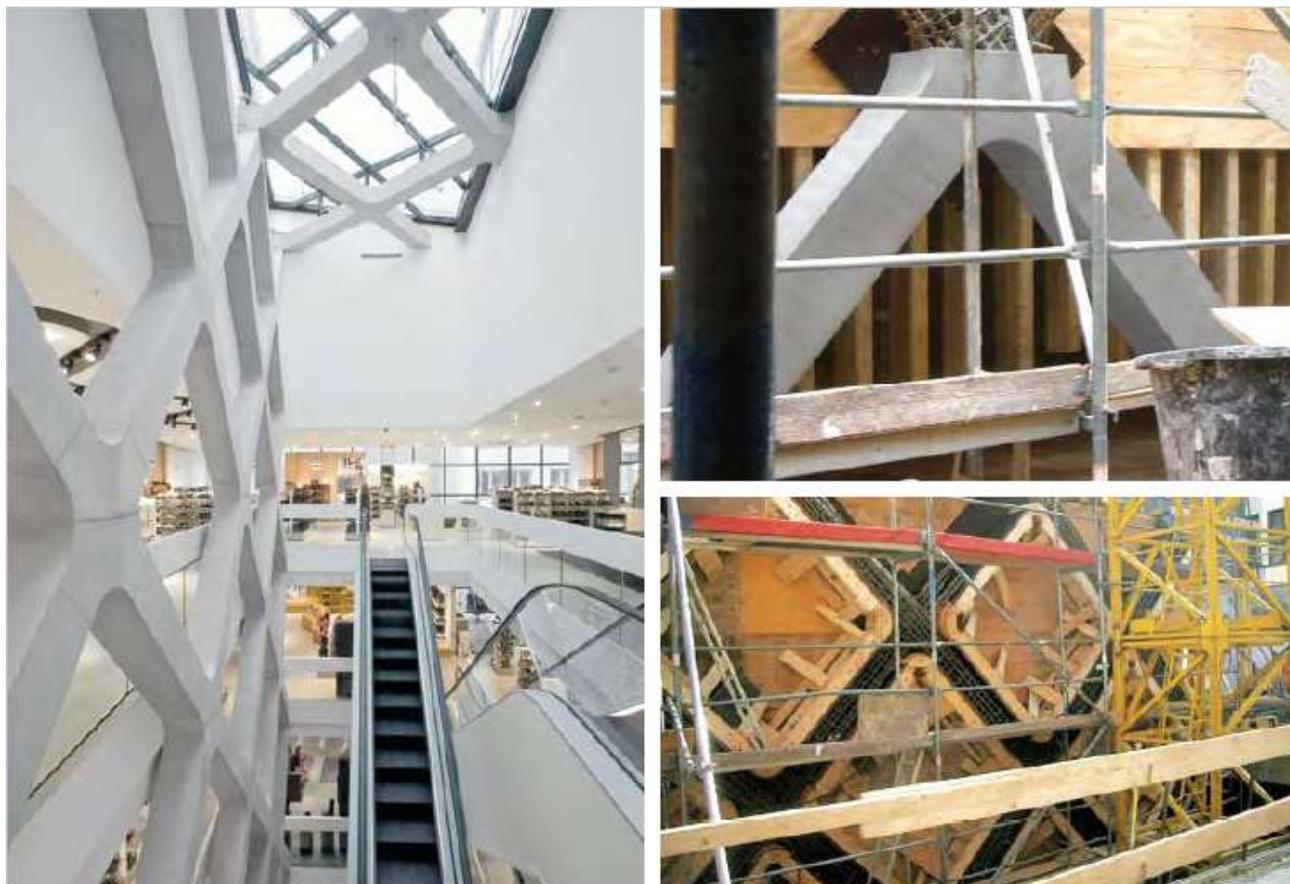
пленочным покрытием

*Особенность*

Бетонное кольцо бетонировалось в лежачем положении, затем с помощью шарнира приведено в вертикальное положение.

Основные элементы здания - 2 изогнутые железобетонные балки, которые придают ему необходимую статическую устойчивость и необычный облик. Каждая железобетонная балка имеет длину 26 метров, высоту 9 метров и весит примерно 131 тонну. Для изготовления таких мощных балок потребовалась специальная технология. Железобетонные балки заливали бетоном в лежачем положении и соединяли с фундаментом с помощью стальных шарниров. Затем балки привели в монтажное положение с помощью автокранов, а шарниры приварили, после чего залили бетоном.

*Торговый дом обуви Görtz*



*Место:*

Ганновер, Германия

*Производство строительно-монтажных работ:*

Wilhelm Wallbrecht GmbH Co KG

Ганновер

*Архитектор:*

Бюро BLOCHER BLOCHER Partners,

Штутгарт

*Опалубка:*

Элементы балочной опалубки FF20, частично с обшивкой палубой, деревянные конструкции для больших закладных коробов

*Палуба:*

Doкарlex — опалубочная плита, многослойная плита с пленочным покрытием

*Особенность:*

Для внутренних скруглений малого радиуса применялась гнутая фанера с лакокрасочным покрытием. Новое шестиэтажное здание Торгового дома обуви и аксессуаров Görtz, модернизация которого обошлась примерно в десять миллионов евро, отличается увлекательной игрой архитектурных форм. Одна из особенностей – несущая ромбовидная конструкция из монолитного бетона, венчающая выход с эскалатора. Замкнутая конструкция, состоящая из трех Андреевских крестов, образует ломаную линию на высоте перекрытия верхнего этажа и одновременно работает как несущая конструкция для остекленной крыши эскалатора.

*Административное здание концерна E.ON*



*Место*

Цоллинг, Германия

*Производство строительно-монтажных работ*

Porr (Германия), Murnau, (Нидерланды)

*Архитектор*

Бюро Boesel Benkert Hohberg, Architekten, Мюнхен

*Опалубка*

Рамная опалубка Framax Xlife, Dokamatic-стол

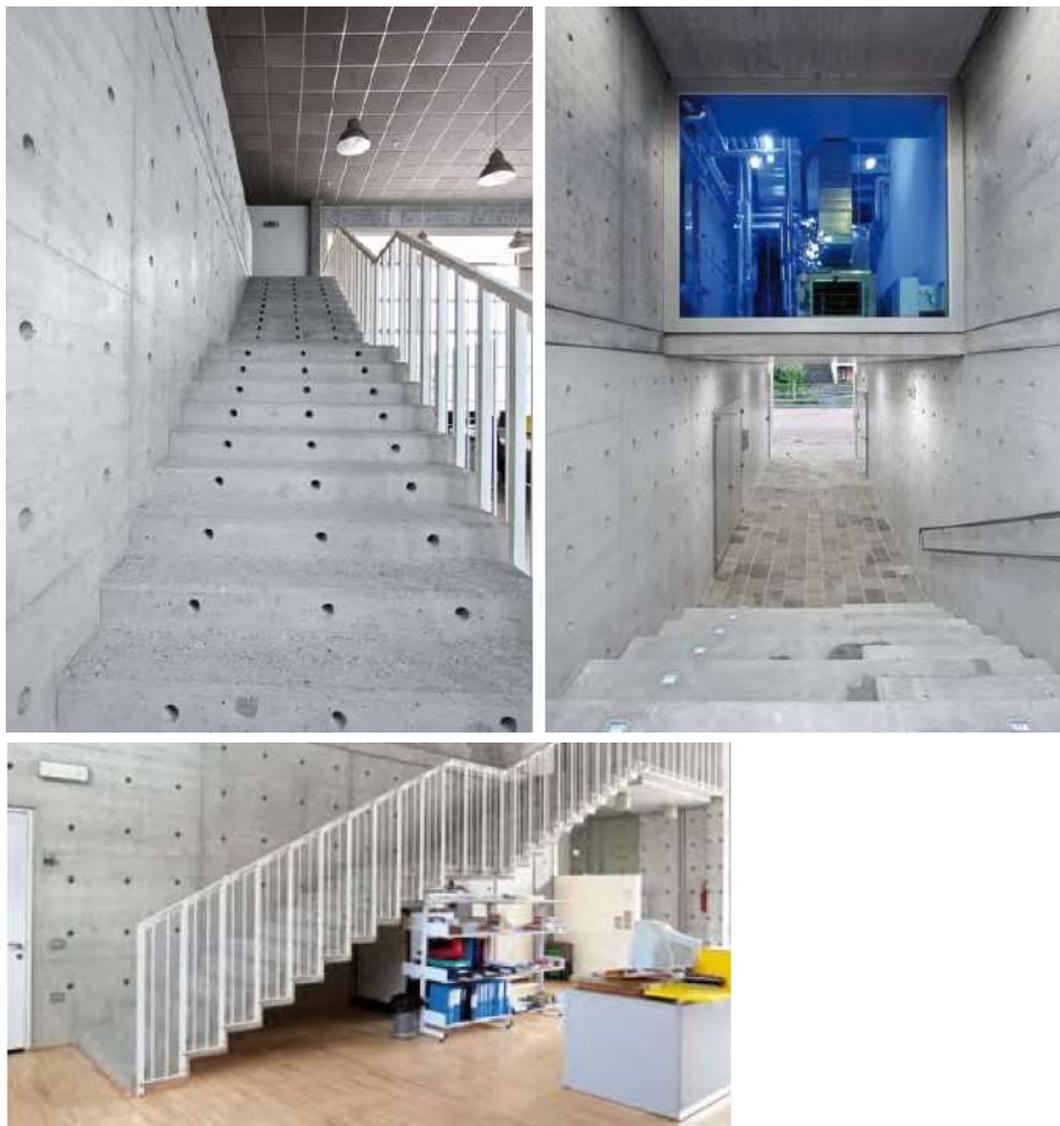
*Палуба*

Xlife-плита

*Особенность*

Наклонное здание с вутами на нижней стороне перекрытий. В г. Цоллинге, вблизи электростанции энергоконцерна E.ON Kraftwerke GmbH, возведено на очень ограниченном пространстве административное здание концерна. Энергоэкономичное компактное сооружение высотой без малого 13 м построено с максимальным использованием облицовочного бетона и имеет наклон в южную сторону для более эффективного использования дневного света. Угол наклона к югу равен  $26^\circ$ , из-за чего боковые стены имеют трапециевидную форму, а фасады наклоняются вперед на южной стороне и отклоняются назад на северной. Стены и внутренние слои перекрытия в зоне входа, расположенной по центру, в пожарном депо, расположенном в западном крыле, и на типовых этажах высотой 3,30 м отделаны облицовочным бетоном класса 3 согласно Инструкции DBV.

*Новое многоцелевое здание*



*Место:*

г. Сотто-иль-Монте-Джованни- XXIII, Италия

*Производство строительных работ:*

Edil Scavil

*Архитектор:*

Антонио Гонелла

*Опалубка:*

Балочная опалубка Top 50

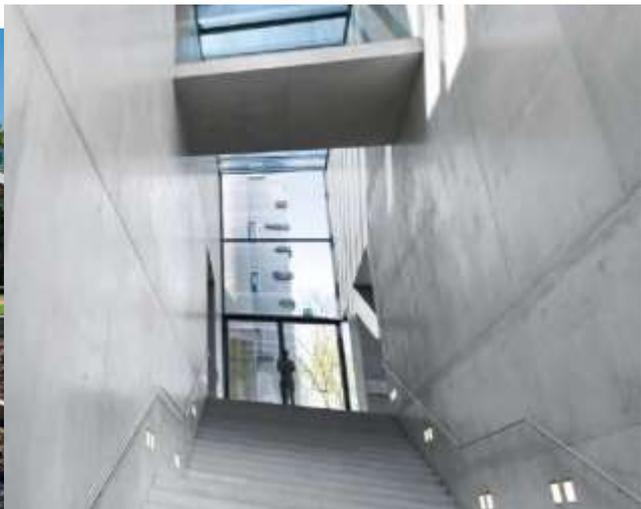
*Палуба:*

Опалубочная плита 3-SO

*Особенность:*

Самоуплотняющийся бетон (SVB), отпечатки древесной текстуры на бетоне

Это многоцелевое здание с отделкой из облицовочного бетона спроектировано архитектором Антонио Гонелла по заказу компаний Arge Edil Scavil srl, Costruzioni Edilcar di Albano S.A. и I.M.I di Piantoni Enzo. Здание, украшенное длинной колоннадой из травертина (известкового туфа) перед главным фасадом, построено полностью из самотвердеющего бетона. Балочную опалубку Top 50 доставили на стройплощадку в полностью собранном виде, что позволило сократить расходы на зарплату строителей. Расчитанный архитектором шаг анкеров образует эстетичный орнамент на стенах из облицовочного бетона во внутренних помещениях.



**Место:**

Будапешт, Венгрия

**Производство строительных работ:**

Gév-Huniber Kft.

**Архитектор:**

TEN Építész Műterem Bt.

**Опалубка:**

Рамная опалубка Framax Xlife

Балочная опалубка Top 50

Круговая опалубка H20

**Палуба:**

Многослойная плита с пленочным покрытием, опалубочная плита 3-SO

Для строительства этого здания, отмеченного архитектурной премией, применялась балочная опалубка Top 50. Стенам из облицовочного бетона придают выразительность многочисленные „окна“, полученные с помощью закладных коробов, которые гвоздями крепились к опалубочным элементам

*Phaeno Science Center в Вольфсбурге*



*Место:*

г. Вольфсбург, Германия

*Производство строительных работ:*

Е. Heitkamp

*Архитектор:*

Архитектурные бюро Zaha Hadid Ltd & Mayer Bährle Freie Architekten BDA

*Опалубка:*

Балочная опалубка Top 50

*Палуба:*

Дощатая опалубка

*Особенность:*

Бетон SVB, геометрия Сооружения

В том, что касается опалубки, здание научно-исследовательского центра Phaeno Science Center с его неповторимой геометрией и требованиями к качеству облицовочного бетона ломает все привычные представления. Использованный при этом строительный материал создает новые масштабы: здание было построено преимущественно из SVB, самоуплотняющегося бетона.

*Пинакотека современного искусства*



*Место:*

Мюнхен, Германия

*Производство строительных работ:*

Alpine Bau Deutschland AG, Эхинг

*Архитектор:*

Штефан Браунфельс

*Опалубка:*

Балочная опалубка Top 50

*Палуба:*

Многослойная плита с пленочным покрытием

*Особенность:*

Рельефные швы

Крупнейший в Германии музей современного искусства с общей площадью выставочных помещений ок. 15.000 м<sup>2</sup> развернут к центру города южной стороной с прозрачным фасадом зимнего сада, а с северной стороны открывается вид на Старую и Новую Пинакотеку. Фасад из облицовочного бетона решен как тонкостенная оболочка из монолитного бетона с заданным шагом швов размером 5,6 м x 2,6 м, выступающим рельефным рисунком в месте стыков палубы и с острыми кромками.

## Выводы

Технология «облицовочного» бетона позволяет проектировать совершенно новые и современные здания и сооружения со своей индивидуальностью, особенностью геометрических форм и естественной фактурой поверхности. Исследование технологии «облицовочного» бетона позволит перевести всю технологию бетонирования на новый профессионально качественный уровень. Это позволит изменить отношение к бетонным работам и в последствии отказаться от наружной и внутренней отделки. Ни для кого не секрет, что многие строители скрывают многие дефекты в несущих конструкциях нанесением отделочного слоя, поэтому с полной уверенностью можно сказать, что здания и сооружения с поверхностями из облицовочного бетона будут более надежными и иметь лучшие эксплуатационные показатели.

Проведенный в нашей статье экскурс по реализованным проектам в Европейских странах показал, что данная технология не только успешно применяется в строительстве, а еще и прилагаются большие усилия в ее исследовании и усовершенствовании.

Исследуя данную технологию, мы рассчитываем оказать практическую помощь строительным компаниям, производящим работы с применением опалубки для лицевой поверхности бетона строящихся конструкций.

## Литература

Cassar L (2004) Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air. *Mrs Bulletin*, 29(05): 328-331.

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV) Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ) (2015): Merkblatt Fassung Juni 2015. Sichtbeton Exposed Concrete, Berlin, Deutschland

Heess S (2009) Architectural concrete with Dyckerhoff Weiss: Design and execution of architectural concrete surfaces. *Betonwerk+ Fertigteil-Technik*, 75(7): 16–26.

Litzner H-U, Goldammer K-R (2005) Philosophy of the new DBV/BDZ-code of practice 'Architectural Concrete' [Philosophie des neuen DBV/BDZ-merkblattes 'sichtbeton']. *Beton- und Stahlbetonbau*, 100 (6), pp. 489–495.

Shilstone Sr JM (1985) Architectural concrete contract documents. *Concrete International*, 7(11): 48–56.

Баженов ЮМ (2003) Технология бетона. 3-е издание. Изд-во АСВ, Москва, Россия.

Гусев ЮВ (ред) (2014) События и Факты. *Строительство, новые технологии, новое оборудование*, 10: 9.

Корчагина ОА (2004) Бетоны и строительные растворы. Издательство ТГТУ, Тамбов, Россия.

Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР, Мосстройкомитет и Главмосархитектура при Мосгорисполкоме (1992) ГОСТ 17608-91: Технические условия. плиты бетонные тротуарные. (с изменением №1). Госстандарт, Москва, СССР.

Некрасова НА, Некрасов СИ, Садикова ОГ (2008) Тематический философский словарь: Учебное пособие. МГУ ПС (МИИТ), Москва, Россия.

Российская Федерация (1995) 169-ФЗ: Федеральный закон об архитектурной деятельности в Российской Федерации. Москва, Россия.

Шильд Е (1982) Строительная физика. Стройиздат, Москва, Россия.