

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Сборник трудов
аспирантов, магистрантов и
соискателей

Технические науки

Нижний Новгород
ННГАСУ
2013

Сборник трудов аспирантов, магистрантов и соискателей.
Технические науки. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2013. – 132 с.
ISBN 978-5-87941-902-3

В сборник вошли работы, выполненные аспирантами, магистрантами и соискателями на кафедрах: архитектуры; безопасности жизнедеятельности; водоснабжения и водоотведения; железобетонных и каменных конструкций; информационных систем и технологий; конструкций из дерева, древесных композитов и пластмасс; металлических конструкций; инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования; информационных систем в экономике; оснований и фундаментов; отопления и вентиляции; строительных материалов; теоретической механики; технологии строительного производства; теплогазоснабжения.

Составители:

Н.Д.Жилина, Н.Б. Камаева (отдел аспирантуры и докторантуры)

Редакционная коллегия:

С.В. Соболев, В.И. Бодров, А.Ф. Борисов, Е.А. Горбачев, С.П. Горбиков, А.И. Колесов, А.Г. Кочев, Г.А. Маковкин, И.В. Молев, С.И. Ротков, А.Н. Супрун, В.П. Сучков, А.А. Яворский

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ.
СТРОИТЕЛЬНАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА**

УДК 728:504

Ал Обайди Каван Таха Ибрахим

Концепция «пассивного» дома

Развитие архитектуры энергоэффективных зданий как направления сейчас становится актуальным по следующим причинам:

1) энергоэффективные здания позволяют поселениям, прежде всего сельским, в наименьшей степени зависеть от тепло- и электроцентралей ввиду того, что энергосберегающие решения в той или иной степени обеспечивают автономность поселениям;

2) энергоэффективные здания, обеспечивая автономность жилых образований, позволяют градостроителям осваивать новые пригодные для проживания территории, что в итоге положительно сказывается на снижении перенаселенности городов;

3) энергоэффективные здания позволяют достичь не только высокого уровня автономности, но также и экологичности проживания, что в целом подводит нас к такому важному аспекту, как повышение устойчивости среды обитания.

Концепция «пассивного дома» стала настоящим прорывом в повышении энергоэффективности мировой экономики. Такой дом не только не зависит от внешних коммуникаций, но, в принципе, может и сам служить источником энергии. Это становится возможным благодаря рациональному использованию источников тепла и энергии самого дома и окружающей его территории. При этом теплопотери предотвращаются благодаря конструктивным особенностям здания, в которых используются современные энергосберегающие технологии и высокоэффективные теплоизоляционные материалы.

Аварийное отопление (на случай длительных морозов), система горячего водоснабжения, электропитание пассивного дома осуществляются за счет энергии природных источников. Кроме того, по максимуму используется тепло от бытовых приборов, стоков, естественное тепло обитателей дома. Наиболее совершенные проекты учитывают даже ориентацию по сторонам света и розе ветров.

Одними из первых проектами энергоэффективных зданий занялись в США. Еще 20 лет назад американский исследователь Дэвид Опп (David Opp) разработал принципы строительства здания, отвечающего всем требованиям экологичности и энергоэффективности. Они включают в себя много позиций, но вкратце сводятся к требованиям максимальной

эффективности использования материалов и технологий. Эти постулаты стали основой для возведения пассивных экзданий по всему миру. В частности, они гласят:

- пассивное здание должно производить больше электрической энергии, чем использовать;
- энергия и материалы должны использоваться с максимальной эффективностью;
- здание должно использовать материалы, произведенные без ущерба или с минимальным ущербом для окружающей среды;
- здание должно обеспечивать строгий учет стоимости его эксплуатации.

Сейчас в Европе принята следующая классификация энергоэффективных зданий: дома низкого энергопотребления (ДНЭ), дома ультранизкого энергопотребления (ДУЭ) и пассивные – не нуждающиеся в отоплении. Работы по повышению энергоэффективности зданий особенно успешно ведутся в Европе – регионе, наиболее зависимом от ввозимых энергоносителей. Накопленный опыт Германии и скандинавских стран, особенно Дании и Финляндии, свидетельствует о том, что даже в районах устоявшейся застройки энергопотери можно свести к минимуму. Суммарный же эффект экономии тепла во вновь возводимых жилых и коммерческих зданиях здесь составляет 50-70%.

Энергия солнца играет важнейшую роль в обогреве экодома. Накапливается она в специальных аккумуляторах, которые обычно устанавливаются на крышах. В холодное время года в качестве дополнительного источника тепла используется генератор, который может работать на природных энергоносителях, таких, как солома, дерево, биогаз и т.д.

Сам дом изготавливается из строительных материалов, которые производятся без ущерба для окружающей среды, являются малозатратными, легко возобновляемыми и позволяют возводить жилье без использования тяжелой техники. К таким стройматериалам относятся грунтоблоки, солома, дерево, камыш и т.д.

Важные компоненты пассивного дома: теплоизоляция, герметичность, вентиляция, «правильные» окна.

Первый этап постройки энергоэффективного дома – выбор экологически верных материалов. Самыми подходящими в этом плане являются дерево, камень, кирпич. В некоторых европейских странах поступают ещё более целесообразно с экологической точки зрения: дома строят из переработанных неорганических материалов – стекла, металла и бетона.

После того как выбран материал, самое время определиться с правильным расположением дома: таким, чтобы солнечные лучи можно было использовать на максимально возможную мощность, чтобы роза

ветров располагалась наиболее удачно, чтобы нейтрализовать вред осадков, например, от града, метелей.

С самых первых дней строительства приступаем к теплоизоляции, ведь здесь должно быть защищено всё: фундамент, пол, стены, потолок, крыша. Теплоизоляцию лучше устанавливать в несколько слоёв, чтобы ликвидировать возможные «мостики холода», не потерять тепло из дома и одновременно не впустить в дом холод (в зимнее время).

Правильные окна – большой шаг на пути к здоровому и самодостаточному дому. Сейчас в энергоэффективных домах используют двухкамерные или трёхкамерные стеклопакеты с аргоном или криптоном – газами, обладающими низкой теплопроводностью. Особенное внимание здесь следует уделить плотному примыканию окон к стенам и дополнительному утеплению оконных проёмов. Важный нюанс: большинство окон желательно расположить на южной стороне дома.

Сложная система вентиляции в пассивном доме устроена так: воздух поступает внутрь и выходит из него посредством системы, имеющей теплообменник. Эта конструкция одинаково эффективна в зимних и летних условиях. Зимой холодный воздух попадает в рекуператор, где тёплый воздух из дома нагревает свежий «уличный» и покидает территорию дома. В дом же попадает свежий воздух, успевший нагреться до оптимальной комнатной температуры.

Летом система работает так же, но с «обратными» температурами. И лишь в редких случаях в помещении могут потребоваться мини-обогреватели или небольшие кондиционеры – это зависит от особых предпочтений хозяина.

Полезные «мелочи» для постройки: грамотное расположение дома, его форма, оптимальные цвета поверхности и применение экономичных источников электроэнергии.

Итак, «пассивные» дома приходят на смену обычным домам так же, как в своё время цветная фотография сменила чёрно-белую. Прогресс очевиден и неумолим.

УДК 624.014

О.С. Девушкина

Современные проблемы проектирования оболочек двоякой кривизны

Попытки использования криволинейных поверхностей в строительстве предпринимались достаточно давно. Ведь купола и своды греческих и римских храмов – те же самые оболочки, только созданные методом подгонки блоков определенной формы. Эта технология прошла

сквозь века и дошла без существенных изменений вплоть до XIX века. Появлялись новые пропорции, менялась форма линии и поверхностей, но купола, своды и арки оставались неизменными.

Первые в мире стальные сетчатые оболочки двойкой кривизны были применены в качестве перекрытия листопрокатного цеха на Нижне-Выксунском заводе выдающимся русским инженером, академиком В. Г. Шуховым в 1897 году. Перекрытие двойкой кривизны из однотипных стержневых элементов является единственным, сохранившимся в России, из более тридцати, возведённых по проектам В. Г. Шухова (рис.1).

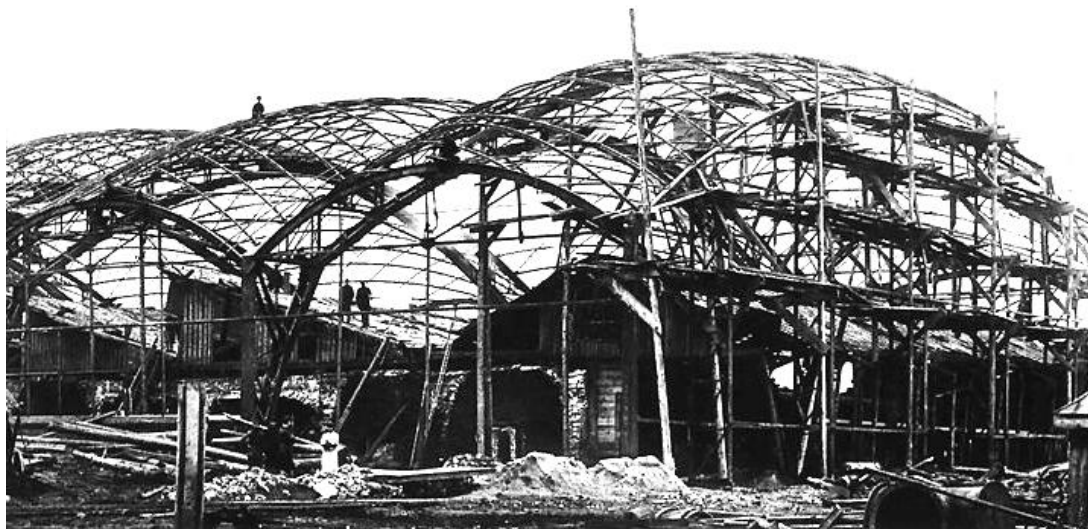


Рис. 1. Листопрокатный цех в Выксе (1897 г.)

Применение В.Г.Шуховым новых форм пространственных конструкций позволило создавать прекрасные образцы инженерного искусства. Сетчатые оболочки-перекрытия (цилиндрические оболочки, оболочки двойкой кривизны и т.д.), обладая выразительностью форм, удовлетворяют функциональным и эстетическим требованиям современной архитектуры. Эти конструкции используются ведущими архитекторами мира, такими как: Сантьяго Калатрава, Поль Андре, Максимилиан Фуксас, Лорд Норман Фостер (здание Факультета Права, рис.2).

Сейчас учеными ведутся работы по снижению себестоимости возведения сетчатых оболочек [1]. Снижение себестоимости сетчатых оболочек возможно с применением легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). Зарубежный и отечественный опыт применения этих конструкций выявил в них ряд преимуществ перед традиционными конструкциями из прокатных профилей:

- низкий расход металла, обуславливающий невысокую стоимость;
- высокая коррозионная стойкость;
- высокая скорость монтажа, незначительные затраты на сборку конструкции и установку ее в проектное положение.



Рис. 2. Здание Факультета Права в Кембридже (Великобритания)

В процессе проектирования этих конструкций особое внимание должно быть уделено конструированию узловых соединений стержней конструкции и обеспечению точности изготовления и монтажа конструкций, которая определяет трудоемкость возведения и влияет на надежность и металлоемкость. Как правило, изготовление этих узлов требует заводской точности, что, естественно, значительно удорожает их производство.

Применение и развитие легких стальных тонкостенных конструкций в России сдерживает отсутствие нормативной базы для их проектирования и расчета. Российский нормативный документ СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» не может быть использован для расчета конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей при $t < 4$ мм (рис.3), так как не учитывает некоторых существенных особенностей их работы. Работа этих конструкций под нагрузкой имеет следующие особенности [2]:

- возможность потери местной устойчивости полок и стенок профилей при продольном сжатии, если соотношение их ширины и толщины превышает 60;
- изгибаемые и сжатые профили несимметричного сечения работают с кручением;
- сплошные профили обладают значительной теплопроводностью и могут быть «мостиками холода» в ограждающих конструкциях.

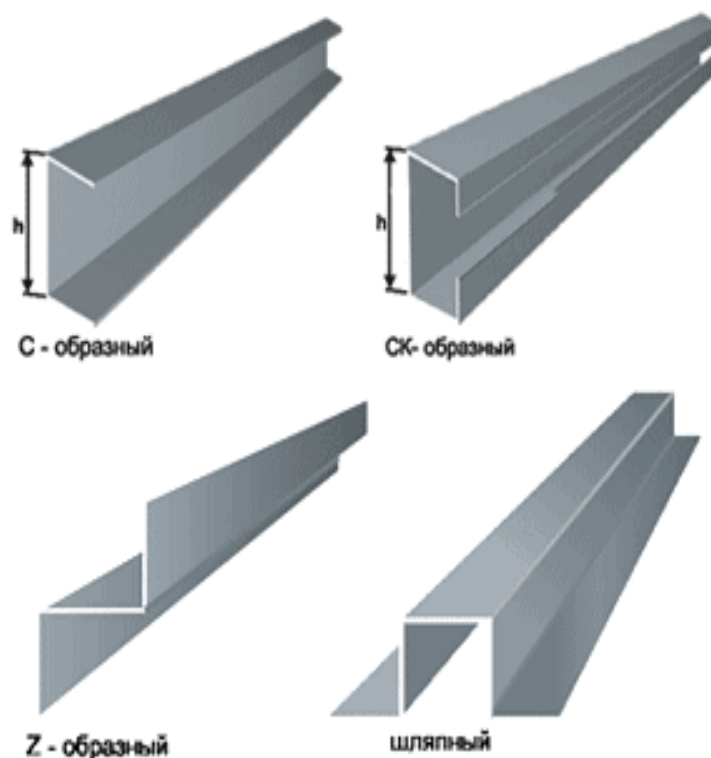


Рис. 3. Тонкостенные холодногнутые профили

Из-за отсутствия отечественного стандарта для ЛСТК расчет таких конструкций в настоящее время выполняют по зарубежным нормам (Еврокод 3, американский стандарт AISI) или стандартам, разработанным организациями с учетом требований этих норм.

Одной из проблем при расчете легких стальных тонкостенных конструкций, состоящих из стержней, является определение расчетной длины при проверке ее на общую устойчивость. Определение расчетной длины для оболочек двойной кривизны в отечественных нормах не освещено, а в Еврокоде 3 не дается ясных указаний по определению расчетной длины сжатых элементов с различными условиями закрепления концов [3], что важно для расчета устойчивости сжатых стержней.

Под устойчивостью конструкций понимают ее способность сопротивляться внешним воздействиям, то есть возвращаться к исходному состоянию равновесия после устранения возмущающих факторов. Если при превышении некоторой нагрузки, называемой критической ($F_{кр}$), появляются новые формы равновесия или вообще исчезают какие-либо формы статического равновесия, система считается неустойчивой [4]. Впервые проблема устойчивости центрально-сжатых стержней была поставлена Л.Эйлером. Он вывел формулу для определения критической силы упругого стержня:

$$F_{кр} = \frac{n^2 \pi^2 EI_{\min}}{l^2}, \quad (1)$$

где n – число полуволин синусоиды, по которым изогнется стержень

(зависит от способа закрепления),

E – модуль упругости материала, для стали $E = 2,06 \cdot 10^5$ Н/мм²,

I_{\min} – меньший из главных центральных моментов инерции поперечного сечения стержня,

l – расчетная длина стержня.

Для определения расчетной длины элемента в оболочке двоякой кривизны, вероятно, будет справедлив следующий подход.

Из формулы (1) можно выразить формулу для определения расчетной длины упругого центрально-сжатого стержня:

$$l = \sqrt{\frac{n^2 \pi^2 EI_{\min}}{P_{\text{кр}}}}. \quad (2)$$

Число полувольт синусоиды, по которым изогнется стержень для оболочки двоякой кривизны из ЛСТК при шарнирном закреплении стержней $n = 1$.

Для определения критической силы потери устойчивости в формуле (2) можно воспользоваться современными программно-вычислительными комплексами и произвести нелинейный расчет на устойчивость элементов конструкции. Результатом такого расчета будет получение коэффициента критической нагрузки k . Тогда критическая нагрузка составит:

$$F_{\text{кр}} = F \cdot k, \quad (3)$$

где F – величина приложенной нагрузки.

После приложения узловой критической нагрузки и расчета конструкции находим критическую силу потери устойчивости и по формуле (2) определяем расчетную длину элементов оболочки двоякой кривизны.

Литература

1. Онтология сетчатых оболочек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forma.spb.ru>

2. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «БалтПрофиль»; Э.Л. Айрумян; М. – 2004 – С. 4.

3. Гарднер, Л. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 3: Проектирование стальных конструкций EN 1993-1-1, 1993-1-3, EN 1993-1-8: пер. с англ. / Л. Гарднер, Д.А. Нетеркот; ред. Серии Х. Гульванесян; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т»; науч. Ред. Пер. А.И. Данилов. Москва : МГСУ, 2012. – 224 с. (Серия «Издано в МГСУ: Еврокоды». Науч. Ред. Серии В.О. Алмазов).

4. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 338 с.

Создание сети внутригородских дамб в Нижнем Новгороде середины XIX века

Нижний Новгород – один из городов России, который может похвастаться необъятными, красивейшими панорамами, открывающимися с откосов на заречную часть и, наоборот, с Волги и Оки вверх, на застройку высокой нагорной части, пластичным рельефом с многочисленными склонами и оврагами. С такими непростыми условиями рельефа при застройке города перед строителями предстают немалые трудности.

В развитие Нижнего Новгорода внесли свой вклад многие талантливые инженеры и архитекторы. Особенно выделяется А.А. Бетанкур, прибывший в Нижний Новгород весной 1817 года в качестве начальника Комитета строений и гидравлических работ для экспертизы проекта строительства Нижегородской ярмарки. Несколько позднее он разрабатывал проект реконструкции нижней части города, а также занимался разработкой (совместно с В.И. Гесте) Генерального плана будущего развития Нижнего Новгорода.

В России А.А. Бетанкур проявил себя в трех ипостасях: как инспектор (ректор) Института Корпуса инженеров путей сообщения (1809-1824 гг.), как руководитель «Комитета для... строений и гидравлических работ... в Санкт-Петербурге...» (1816-1824 гг.) и как главный директор путей сообщения (1819-1822 гг.).

В этих основных направлениях деятельности А.А. Бетанкур опирался на своих одаренных сподвижников, которые активно помогали реализовывать его честолюбивые планы. Что касается Нижнего Новгорода, здесь следует упомянуть одного из лучших его учеников – П.Д. Готмана, которого А.А. Бетанкур вовлек в свою команду, занимавшуюся строительством ярмарочного комплекса в Нижнем Новгороде.

П.Д. Готман окончил Институт Корпуса Инженеров Путей Сообщения в г. Санкт-Петербурге. После смерти А.А. Бетанкура он возглавил строительство и развитие ярмарочного ансамбля. В 1830-1840гг. П.Д. Готман занимался разработкой переустройства всего Нижнего Новгорода. Он являлся не только организатором производства, но и сам проектировал: речные съезды, набережные и другие сооружения, заслужил звание инженера-генерала.

П.Д. Готман положил начало строительству дамб в Нижнем Новгороде.

В ЦАНО сохранилось «Дело по Рапорту Нижегородской Городской Думы о мощении мостовых и исправлении мостов. Ноября 2 дня 1840 г.». В Рапорте говорится, что «исправление мостов и содержание их в должной

исправности» осуществляется по распоряжению Строительного Комитета. Далее Городская Дума просит: «Не соблаговолит ли Комитет по содержанию выше объясненного положения со следующего 1841 года устройство общественных мостовых, тротуаров и мостов, а равно и исправления домов, занимаемых полицейскими помещениями, принять в распоряжение свое и в разрешении сего удостоить Думу предписанием».

В последующем существующие в городе мосты подлежали обследованию на их дальнейшую эксплуатацию.

Последовало Дело по предписанию военного губернатора Бутурлина о ветхости деревянного Варварского и Острожного мостов через Ковалихинский ручей (24.05.1839 - 10.09.1840 г.).

На это предписание П.Д. Готман выдает Рапорт. В нем говорится, что обследование Варварского моста было поручено поручику Литвинову. В ходе проведенного обследования делается заключение о ветхости моста и необходимости его немедленной разборки «...поставленные под него столбы...подгнили при поверхности земли, а сорок из них совершенно сгнили и к использованию не годны... насадки поперечные и балки продольные совершенно сгнили... по продольным балкам насланный сплошь поперек моста накатник из пластин совершенно сгнил... по накатнику насланный дощатый пол снизу подгнил от сырости, а сверху попорчен проездом экипажей...». Далее П.Д. Готман пишет «По изъяснению всех выше перечисленных причин мост сей к исправлению негоден... имею честь присовокупить, что я со своей стороны нахожу удобнее устроить земляную дамбу.»

Предположительно, вышесказанное свидетельствует о начале замены деревянных мостов через протекающие реки Нижнего Новгорода дамбами. Так, в 30-40-х годах XIX века вместо моста через Ковалихинский ручей была устроена Варварская дамба (рис.1), проезжая часть была выровнена, овраг у выхода из города был засыпан Острожной дамбой. После осадки насыпного грунта в 1844 году улица была вымощена просмоленными брусьями отслуживших свой срок лодий и барок (речные суда больших размеров, которые по истечению своего срока эксплуатации разбирались на дешевый строительный материал) и которые стали заменяться булыжником в 50-х годах XIX века.

Кроме того, в 1830-е гг. в Нижнем Новгороде создавалась целая сеть внутригородских дамб через глубокие овраги и речки: Покровская (между Покровскими прудами через Ковалихинский ручей), Лыкова (через речку Почайну) (рис.1). Последняя проектировалась в общей системе градостроительных преобразований города архитекторами И.Е. Ефимовым и П.Д. Готманом.

Из истории известно, что в древности Верхний посад и район Започаинья сообщались мостом через глубокий, промытый рекой Почайной овраг. Известный воевода Б.М. Лыков «через реку Почайну мост

высок сделал». Это был рубленый деревянный мост, высотой до 80 м, который неоднократно подновлялся.

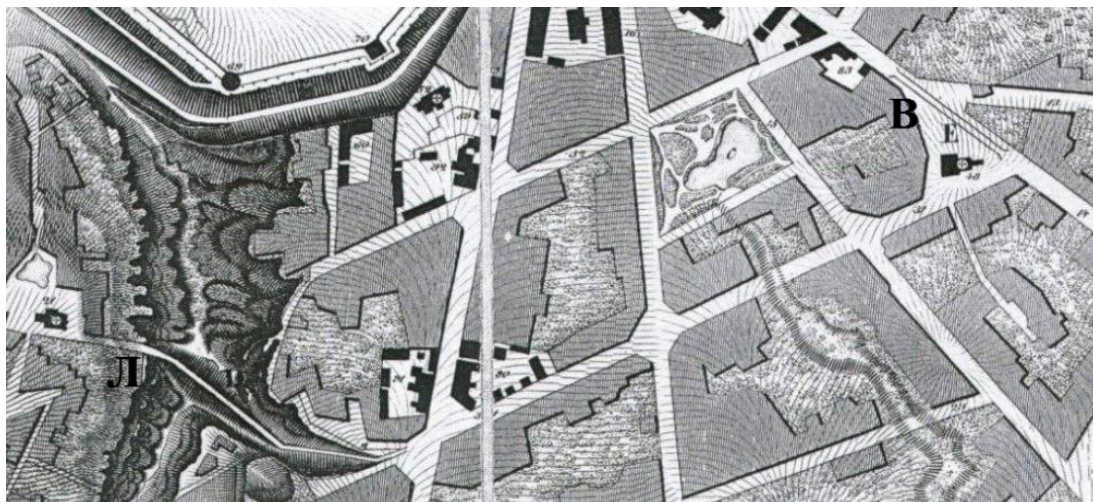


Рис.1. Лыковая дамба (Л) и Варварская дамба (В)
на карте Нижнего Новгорода 1845 года

В 1824 г. архитектор И. Е. Ефимов предложил возвести вместо него арочный каменный по типу римского акведука. В 1834 г. было решено насыпать земляную дамбу и заключить реку Почайну в коллектор. Это устраняло многие проблемы жизни нижегородцев, создавало запас воды на случай пожара. Основой дамбы стал ростверк из камня-дикаря на сваях. Для вод реки Почайны внутри дамбы проложили каменную трубу диаметром 1,5 м, над которой на высоте 21 м уложили полотно проезда. К 5 августа 1838 года работы были закончены со значительной экономией средств, и по дамбе открыли движение.

Литература

1. Бегам, Л. Г. Регулирование водных потоков при проектировании дорог / Л. Г. Бегам ; под ред. Л. Г. Бегам. – М. : Транспорт, 1977.– 304 с.
2. Варварская улица (Нижний Новгород) [Электронный ресурс] / Википедия : свобод.энцикл. – Режим доступа : [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%F0%E2%F0%F1%EA%FF_%F3%EB%E8%F6%E0_\(%D%E8%E6%ED%E8%E9_%D%E2%E3%E%F0%E4\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%F0%E2%F0%F1%EA%FF_%F3%EB%E8%F6%E0_(%D%E8%E6%ED%E8%E9_%D%E2%E3%E%F0%E4)).
3. Глянуть на Почайну [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.extra-n.ru/text/bisnes/glyanut_na_pochajnu/.
4. Корнев, Л. И. Сподвижники А. А. Бетанкура в России [Электронный ресурс] / Л. И. Корнев. – Режим доступа : <http://isaak.spb.ru/reading/y2008/korenev>.
5. ЦАНО (Центр.архив Нижегород. обл.). Ф. 217. Оп. 666. Д. 263.
6. ЦАНО (Центр.архив Нижегород. обл.).Ф. 217.Оп. 666.Д. 352.

Экспериментальное исследование влияния конструктивных особенностей поперечного сечения профилей типа ПН и ПС на формы потери несущей способности при центральном сжатии

Для проведения экспериментального исследования несущей способности тонкостенных холодногнутых профилей при центральном сжатии разработана конструкция испытательного стенда (рис. 1а) для испытания 4-х моделей (ПС-1, ПС-2, ПН-1, ПН-2).

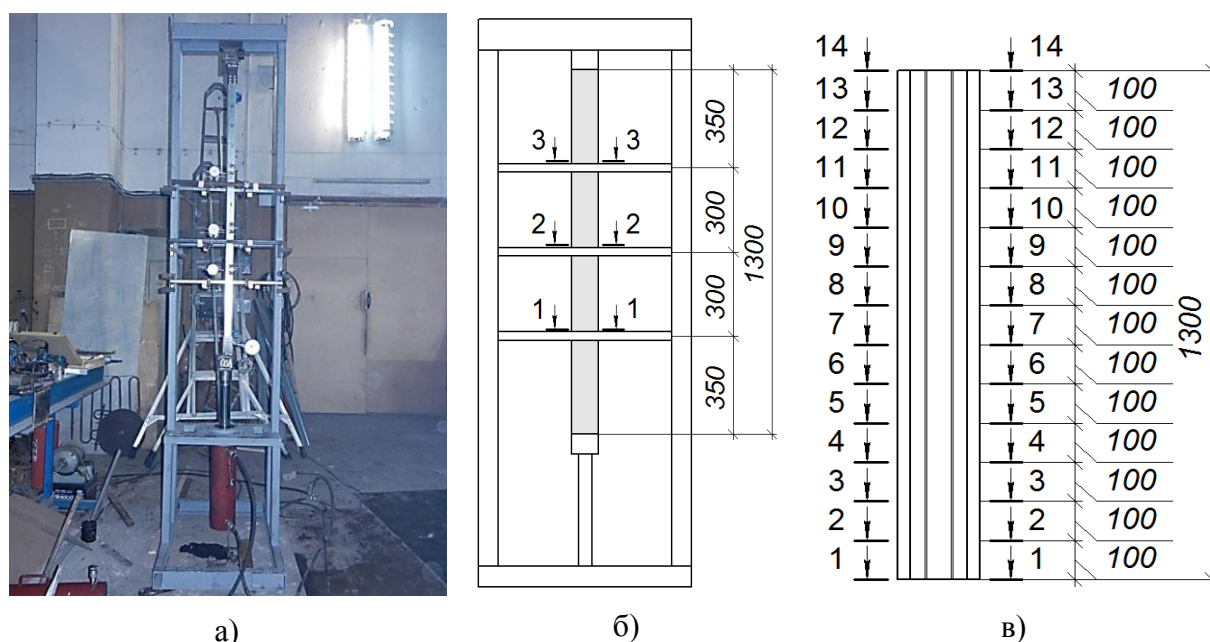


Рис. 1: а) испытательный стенд, готовый к работе; б) схема установки индикаторов на испытуемый образец; в) схема сечений по длине профиля

Нагружение проводилось ступенями с выдержкой под нагрузкой в течение времени, необходимого для затухания деформаций. Общим ориентиром для момента затухания деформаций служат показания индикаторов. Величина ступени нагружения – не более 10% от предельной нагрузки, определенной по результатам численного расчета.

Процесс испытания осуществлялся следующим образом:

1. 1÷2 пробных нагружения в упругой стадии до величины нагрузки, равной около 20% от расчетной предельной, с последующим разгрузением до нуля; цель пробных нагружений – обмятие образца для стабилизации показаний индикаторов.

2. Нагружение ступенями до потери местной устойчивости с регистрацией показаний индикаторов, прогибомера и измерения ширины раскрытия полок профиля. Снятие отсчетов и показаний осуществлялось в конце каждой ступени нагружения.

Для замера деформаций на профиле установлены 12 индикаторов часового типа: по 3 на край каждой полки и по 3 ближе к месту сгиба стенки и полки (2 ряда на стенке). Индикаторы установлены на расстоянии 350, 650 и 950 мм от нижнего опорного узла в соответствии с деформированной схемой по результатам численного расчета. Схема установки индикаторов приведена на рис. 1б. Ширина раскрытия полок профиля измерялась в сечениях, схема расположения которых представлена на рис. 1в.

Экспериментальное исследование проведено на центральное сжатие силой, приложенной к нижней опоре профиля. При этом передача нагрузки от 50 кг гидравлического цилиндра с диаметром поршня 78,5 см² осуществляется через гибкий посредник (рис. 2а) и через жесткий башмак (рис. 2б). Гибким элементом выступает направляющий (для модели ПС-1) и стоечный (для модели ПН-1) профиль из оцинкованной стали толщиной 0,8 мм.

В результате шагового (по ступеням) приложения нагрузки получены значения отклонения полок и стенки от первоначального положения, а также изменение формы и геометрии профиля. На рис. 3 и рис. 4 приведены графики изменения показаний индикаторов от нагрузки по полке и стенке для экспериментальной модели ПС-1.

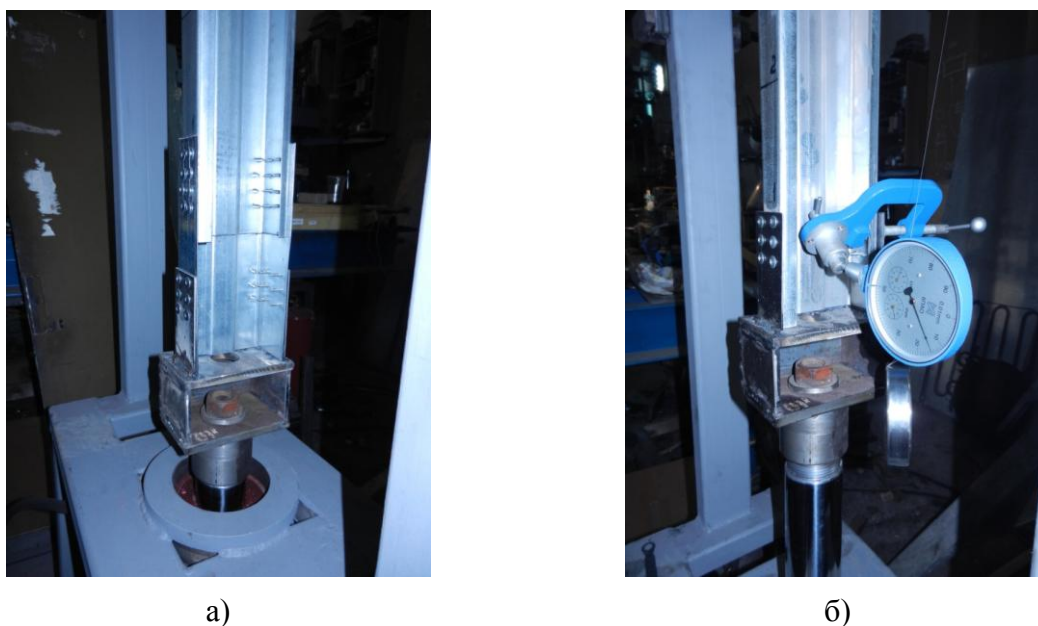


Рис. 2. Варианты опорных узлов экспериментальных моделей:
а) через элемент-посредник; б) в жестком башмаке

Испытание выполнено для следующих моделей:

- ПС-1: профиль ПС-100-0,8, длиной $l=1\ 310$ мм, соединения по концам – через элемент-посредник, обеспечивающий возможность поворота опорных сечений, что в идеализированном представлении соответствует условиям шарнирного закрепления. Полная площадь поперечного сечения – $A_{п.с.} = 1,64$ см², гибкость – $\lambda = 88,5$;

- ПС-2: профиль ПС-100-0,8, длиной $l=1\ 300$ мм, соединения по концам заделаны в жесткий башмак, обеспечивающий отсутствие поворота опорных сечений, что в идеализированном представлении соответствует условиям жесткого закрепления. Полная площадь поперечного сечения – $A_{п.с.} = 1,64\text{ см}^2$, гибкость – $\lambda = 43,9$;

- ПН-1: профиль ПН-100-0,8, длиной $l=1\ 320$ мм, соединения по концам – аналогично модели ПС-1. Полная площадь поперечного сечения – $A_{п.с.} = 1,60\text{ см}^2$, гибкость – $\lambda = 87,4$;

- ПН-2: профиль ПН-100-0,8, длиной $l=1\ 300$ мм, соединения по концам – аналогично модели ПС-2. Полная площадь поперечного сечения – $A_{п.с.} = 1,60\text{ см}^2$, гибкость – $\lambda = 43,0$.

Анализ данных рис. 3 показывает, что при последовательном нагружении стержня с шагом $2\ 310$ Н до нагрузки $9\ 241$ Н идет пропорциональное увеличение отклонения полки, а до нагрузки $13\ 862$ Н – пропорциональное увеличение отклонения стенки поперечного сечения от первоначально устойчивой формы. Нагружение профиля до величины нагрузки, соответствующей $16\ 172$ Н, привело к увеличению интенсивности перемещений и изменению характера деформаций, что свидетельствует о наступлении предельного состояния. При последующем выдерживании профиля под нагрузкой $16\ 172$ Н в течение времени, необходимого для затухания деформаций, и дальнейшем увеличении нагрузки до $17\ 712$ Н произошла потеря несущей способности стержня, которая сопровождалась появлением изгибных деформаций по длине профиля и потерей местной устойчивости стенки и полки. При этом общая характеристика деформации сжатого профиля соответствует результатам, полученным численным методом в ПК Nastran (рис. 4), характерным для потери общей устойчивости сжатого стержня.

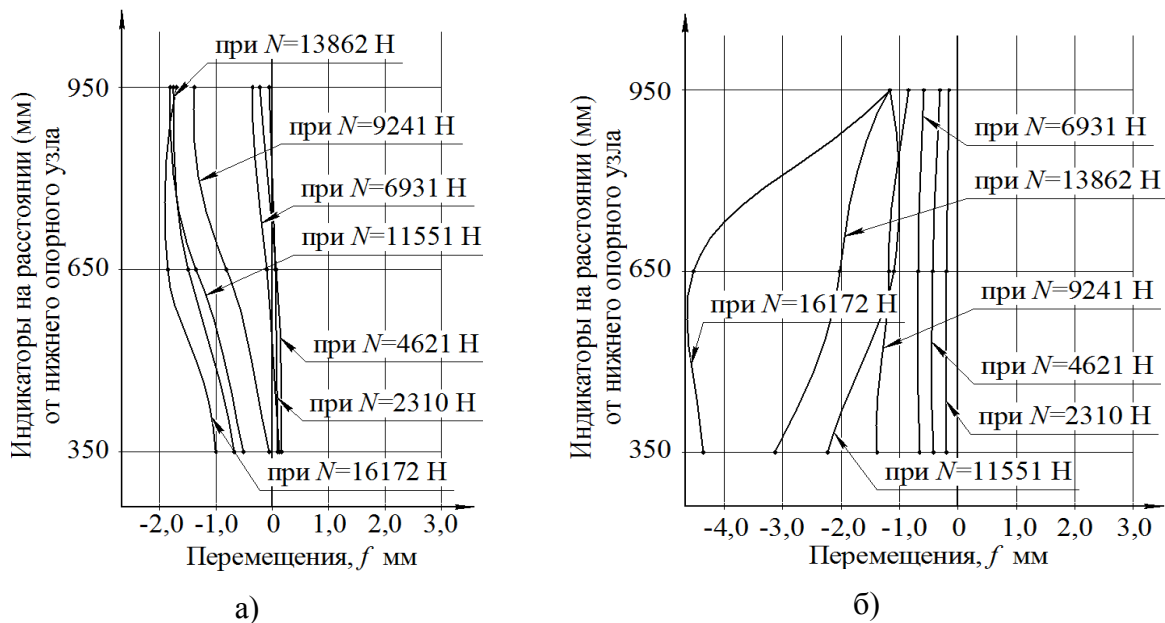


Рис. 3. Графики изменения показаний индикаторов от нагрузки модели ПС-1:

а) по полке; б) по стенке

Аналогично выполнен анализ перемещений полок и стенок по остальным экспериментальным моделям. Для модели ПС-2 характерным является появление изгибных деформаций и потеря общей устойчивости. Для моделей ПН-1 и ПН-2 произошла потеря несущей способности, сопровождающаяся потерей местной устойчивости полок – появлением волнообразного деформированного состояния. Шаг волн в моделях составил 200 мм. Результат эксперимента для модели ПН-2 представлен на рис. 5.

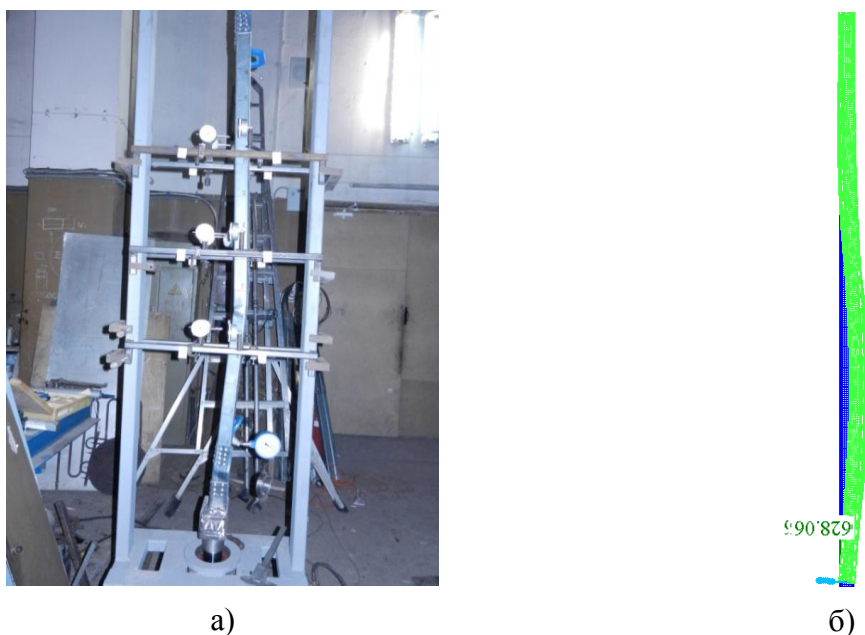


Рис. 4. Деформация профиля ПС-1 от сжимающей нагрузки с появлением изгибных деформаций: а) результат эксперимента; б) численно полученная схема деформации

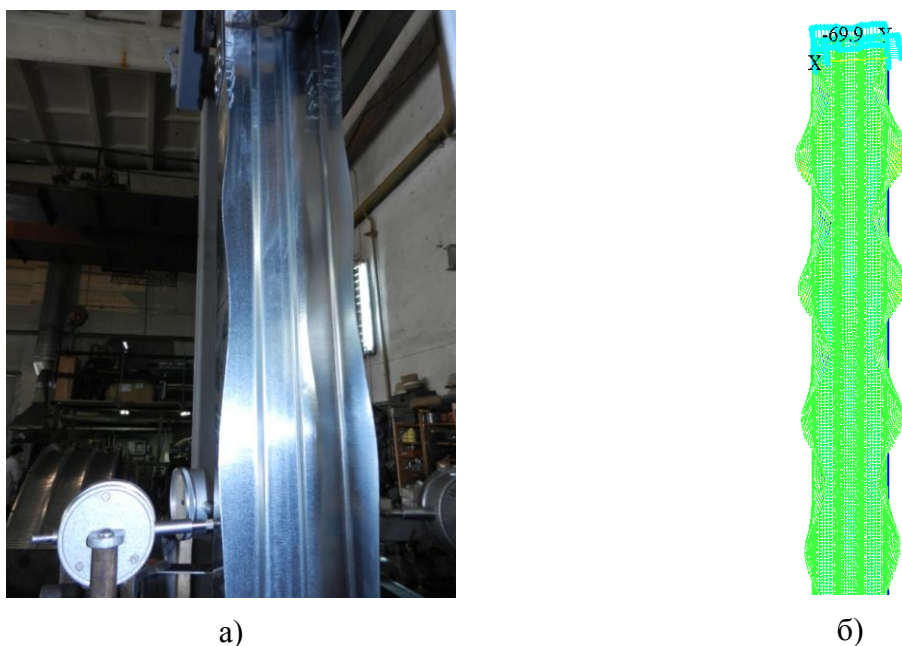


Рис. 5. Волнообразное деформированное состояние полок профиля ПС-1 от сжимающей нагрузки: а) экспериментально; б) численно полученная схема деформации

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований сжатого тонкостенного гнутого профиля выявили два критерия потери несущей способности для профилей различной формы поперечного сечения. Установлено, что для профилей со значением гибкости, не превышающем 90, для сечений без краевого отгиба полость потеря несущей способности происходит в результате потери местной устойчивости полостей. При этом изгибная деформация, соответствующая потере общей устойчивости, отсутствует. Для профилей с краевым отгибом потеря несущей способности происходит по критерию общей устойчивости и только на последнем шаге нагружения появляются деформации, соответствующие потере местной устойчивости в упругопластической стадии работы материала.

2. Анализ деформированных схем, полученных в ходе проведения экспериментального исследования для профилей типа ПС и ПН, показал, что они соответствуют деформированным схемам аналогичных типов профилей, определенным численным методом. Так, для профилей с краевым отгибом характерным является появление изгибных деформаций с закручиванием поперечных сечений и появление упругопластической деформации на последних шагах нагружения. Для профилей без краевого отгиба характерным является отсутствие изгибных деформаций и появление волнообразного деформированного состояния полостей профиля в стадиях упругой и упруго-пластической работы материала. Шаги волн, определенные из экспериментального исследования и в результате численного расчета, соответствуют друг другу и составляют 200 мм.

Литература

1. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Stage 34. CEN. European Committee for Standardisation. 2004. – 127 p.

2. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции: свод правил: утв. М-вом регионального развития РФ 27.12.2010: взамен СНиП II-23-81* : дата введ. 14.08.81. – М.: Госстрой СССР, 2001. – 96 с.

3. Айрумян, Э.Л. Исследование действительной работы тонкостенных холодногнутох прогонов из оцинкованной стали/ Э.Л.Айрумян, В.Г. Галстян // Промышленное и гражд. стр-во. – 2002. – № 6. – С. 31 – 34.

Об обеспечении качества бетонных поверхностей при формировании и выдерживании железобетонных конструкций

В зоне контакта бетона и опалубки происходят сложные процессы как на физическом, так и механическом уровнях взаимодействия.

Бетон в процессе твердения, особенно на начальной стадии, может быть поврежден опалубкой при ее смещениях или распалубке (немедленная или ранняя распалубка). Приконтактный слой бетона, который имеет высокое сцепление с опалубкой, может повредиться или вообще отслоиться. При распалубке конструкций на поверхности щитов может оставаться тонкий или, в ряде случаев, заметный слой бетона. Толщина этого слоя зависит от степени шероховатости опалубки. Так, на поверхности деревянной опалубки остается слой бетона толщиной примерно 1-2 мм, на новой стальной опалубке – тонкий слой (менее 1 мм), на гладкой фанерной или полимерной (в том числе обработанной специальными составами) поверхности обычно наблюдается наличие только цементной пленки. В случае изношенных опалубок толщина слоя налипшего бетона может значительно возрастать.

Смещению опалубки необходимо препятствовать. Мероприятия, уменьшающие сцепление бетона с опалубкой, классифицируются по способу их воздействия. Величина сдвига определяет вид напряжений: растягивающие или скалывающие. Даже небольшой сдвиг (около 0,1 мм) может способствовать дальнейшему отслоению цементной корки. Сдвиг опалубки вызывает отслоение в виде шелушения и может привести к образованию маленьких или больших трещин, расположенных перпендикулярно направлению сдвига.

При раннем снятии опалубки с бетонных изделий возникают растягивающие напряжения, при которых цементная корка может отслоиться. Такое же отслоение может произойти при смещении опалубки, вызванном недостаточно прочным соединением ее элементов. Еще существует одна из гипотез, объясняющая преждевременное отслоение опалубки от бетона уменьшением объема бетона вследствие усадки. Усадочные процессы особенно быстро протекают в изделиях, отформованных из литых бетонных смесей в опалубке с относительно высокой проницаемостью. Например, при использовании опалубки из массивного дерева при быстром высыхании древесины с наружной стороны может наступить критическая ситуация, приводящая к короблению отдельных досок. Доски опалубки становятся сводчатыми и отделяются от бетона в середине или по краю изделия. Величина усадки различна по высоте, в результате одни доски могут отслаиваться, а другие – нет. Зазоры, образующиеся при этом между опалубкой и бетоном, могут

заполняться водой (атмосферными осадками, водой, применяемой при уходе за бетоном, конденсатом), что впоследствии приводит к ухудшению качества поверхности бетона [1].

Обеспечение качества бетонных поверхностей напрямую зависит от процессов взаимодействия между опалубкой и бетоном. Погодные условия, в свою очередь, играют не последнюю роль. Горизонтальные открытые поверхности бетона могут испытывать сильные повреждения, особенно от высыхания или мороза. При быстром высыхании бетона из цемента удаляется вода, необходимая ему для твердения. Первые соединения между частицами еще состоят из гидратов, богатых водой, которые при ранней сушке снова разрываются и разгруппировываются. Чем раньше и скорее отнимается из смеси вода, тем отчетливее проявляются повреждения на бетонной поверхности. Особенно сильно они выражаются при одновременном воздействии на бетонную поверхность солнечных лучей и ветра. Последующее увлажнение бетона уменьшает дефекты, полученные при высушивании бетона, но полностью их не устраняет.

Открытые бетонные поверхности в начальной стадии твердения бетона могут быть повреждены морозом. При замерзании свободной воды растворная составляющая бетона разрыхляется, пронизывается сеткой иголок льда. Низкая температура очень сильно замедляет реакцию твердения, но, в отличие от сушки, не изменяет химических реакций в цементе. При потеплении снова происходит нормальная гидратация цемента. Однако расчетная прочность бетона значительно уменьшается, если бетон до замерзания не наберет критической прочности. Дожди портят бетонную поверхность только в том случае, если в уплотненной бетонной смеси еще не закончились процессы схватывания цементного теста.

Для придания поверхности определенных свойств ее подвергают дополнительной обработке. Например, для получения основы с хорошим сцеплением для штукатурки или окраски, поверхность делают шероховатой – промывают щелочным мылом и наносят грунтовку. Лучшие результаты получаются, если поверхность подвергнуть пескоструйной обработке. Влажное содержание молодого бетона способствует получению бетонных поверхностей высокого качества. Эти меры должны сделать поверхность однородной. Смачивание часто способствует появлению кристаллического налета и неравномерного серого тона бетона. Сточная вода на бетонной поверхности богата гидратом кальция, и в дальнейшем, когда поверхность высыхает, на ней остается белый налет, а если стекает вода, то известь удаляется. В первом случае будет относительно светлая поверхность, во втором – темная с коричневатыми штрихами по основному серому тону. Если эти два процесса проходят одновременно, то получается пятнистая лицевая

поверхность с сильными светло-темными контрастами и темными следами подтеков. По этой причине при доводке лицевых поверхностей бетона в большинстве случаев отказываются от его влажного хранения. Однако при очень сухой погоде или для исправления недостатков бетона необходимо применять увлажнение. В этих случаях воду можно наносить или непрерывно, обеспечивая ее равномерный сток, или периодически. В этом случае важно следить за тем, чтобы вода равномерно испарялась с поверхности, но не стекала [2].

На поверхности бетона как проницаемого тела могут выступать кристаллические налеты, которые могут образовывать сплошной покров. Они появляются, когда непрерывный влажностный поток жидкости транспортирует растворенную соль из тела бетона или из пространства к поверхности, где она и откладывается.

Высолы в первую очередь появляются на поверхностях и состоят из гидроокиси кальция или карбоната кальция. Карбонат натрия, хлористый натрий, хлорид кальция, фосфат натрия и другие соли чужды бетону, и их высолы образуются только в том случае, если в бетон введены добавки, содержащие эти соли, или попали загрязнения.

При обработке бетонной поверхности с целью регулирования ее цвета большое внимание следует уделять высолом извести. Выделение извести из портландцементных бетонов – очень неприятное явление, которое неразрывно связано со свойствами материалов. Можно различить три основных условия, вызывающих это явление: избыточное содержание гидроокиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при реакции твердения портландцемента; проницаемость цементного камня, главным образом в молодом возрасте; экстракционное действие внешней стоячей воды (вследствие особых химических свойств извести).

Высолы на поверхности бетона нередко имеют характерные формы. В первую очередь они повторяют очертания первоначального мокрого участка поверхности, подчеркивают отдельные места примыкания к бетону опалубочных элементов или свидетельствуют об этапах бетонирования. Это вызвано различными процессами, происходящими около опалубки при распалубке и при воздействии погодных факторов. Высолы извести, как правило, очень устойчивы, они нерастворимы в воде и обычными средствами их удалить трудно.

Появление в бетоне трещин неизбежно. Причины их образования разнообразны. Рассмотрим трещины, которые связаны с формированием приповерхностных слоев. Они снижают качество и эстетическое восприятие поверхности. Трещины проходят иногда внутрь до арматурных стержней, где способствуют развитию коррозии металла и появлению на поверхности ржавых пятен. В суровых климатических условиях толщина защитного слоя бетона над арматурой должна составлять не менее 30 мм, а ширина трещин не должна превосходить 0,1 мм. На бетонных

поверхностях можно наблюдать трещины сетчатого очертания. Чем больше размер ячейки такой сетки, тем шире трещина и тем глубже она проникает в тело бетона. Средний размер ячейки колеблется от 10 см до нескольких миллиметров, в последнем случае трещины на гладкой поверхности бетона можно увидеть только с помощью увеличительного стекла.

Так как участки бетона, окружающие трещины, после атмосферных осадков иногда остаются долгое время сырыми, то в этих местах откладывается больше защитных частиц, которые закрывают доступ влаги в трещины. Выделение извести в этом случае может быть рассмотрено не как недостаток, а как преимущество. Трещины сетчатого очертания возникают преимущественно вследствие усадки бетона в различных его слоях, расположенных на различных глубинах от поверхности бетона. Время очень неопределенно, тем более что набор прочности и рост напряжений от усадки бетона происходят одновременно и точка пересечения кривых, которая определяет момент времени, соответствующий образованию трещин, является переменной. Если критическая точка достигнута рано, при еще небольшой прочности бетона возникают сетчатые трещины с малым размером ячейки, с малой шириной раскрытия и с малой глубиной проникания. И, наоборот, в более поздние сроки твердения возникают относительно глубокие и широкие трещины, когда усилия растяжения значительны. После того как прочность на растяжение бетона достигнет какой-то определенной величины, напряжения, возникающие от усадки бетона, не могут ее превысить, и в этом случае уже исчезает опасность возникновения трещин. Хранение бетона во влажных условиях существенно замедляет усадочные процессы и способствует получению плотного бетона без трещин.

Опасность образования трещин создается также при охлаждении бетонной поверхности. В этом случае происходит контракция поверхностного слоя бетона с возникновением соответствующих температурных напряжений растяжения, так как в центральных зонах бетон не подвержен этим воздействиям и сохраняет свой объем и температуру.

Старение бетона – процесс, в ходе которого также образуются трещины на бетонных поверхностях. В процессе эксплуатации бетонная поверхность подвергается различным климатическим и механическим воздействиям. При этом следует различать, вызывают ли внешние воздействия химические или физические изменения. Признаком старения бетона, значительным, но снаружи невидимым, является медленно протекающий процесс карбонатизации свободной гидроксиды кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$. При этом $\text{Ca}(\text{OH})_2$ реагирует с углекислотой воздуха и переходит в нерастворимый карбонат кальция CaCO_3 . Так как гидроксид кальция – сильная щелочь, ее можно легко выявить при помощи индикатора,

например фенолфталеина. Степень карбонатизации определяется на свежем изломе бетона. При хорошем качестве бетона процесс карбонатизации за год проникает в глубину изделия менее чем на 1 мм. В пористом цементном камне или при неплотном поверхностном слое бетона процесс карбонатизации протекает быстрее и уже через несколько лет может достичь арматурных стержней, в этом случае теряющих свою химическую и антикоррозионную защиту. Этот процесс следует особенно учитывать, если предусматривается окраска бетона. От характера процесса карбонатизации зависят плотность и прочность бетонной поверхности, а также ее цвет.

Внешнему механическому воздействию подвергается в первую очередь лицевая поверхность бетона. Здесь обнаруживаются недостатки и преимущества различных его свойств. Выбором заполнителей бетона и подбором гранулометрического состава заполнителей прочность бетона на истирание может быть улучшена, в то время как на сопротивление сосредоточенной нагрузке или удару можно влиять только в незначительных пределах. Повышенную истираемость бетона можно наблюдать на многолюдных улицах, лестницах и на переходах, а также на основаниях водоводов или искусственных стоков. В определенных областях поверхности воздействие нагрузки может быть особенно сильным и способно привести к появлению выбоин и «желобов». В сопоставлении с другими материалами бетон обнаруживает довольно хорошую прочность на истирание. Она может быть повышена, если часть крупных заполнителей заменить заполнителем из особенно прочных горных пород или в поверхностный слой уплотненной бетонной смеси добавить щебень из искусственных материалов повышенной твердости. В качестве естественных материалов для этих целей могут быть использованы кварциты, базальты, окаменелый известняк, а в качестве искусственных – медные и свинцовые шлаки, корунд, карбид кремния (карборунд) или кремнистое железо. Иногда в поверхностные слои, подвергаемые изнашиванию, вводят стальную стружку или металлическую крошку. Во вторую очередь прочность на истирание зависит от прочности на сжатие. При одинаковом составе крупного заполнителя сопротивление истиранию увеличивается с увеличением прочности бетона на сжатие. Это свойство базируется на лучшем качестве твердых частиц, а не на повышении прочности износу цементного камня [3].

В заключение следует подчеркнуть, что процесс создания бетонных поверхностей заданного качества является многоуровневым и содержит большое количество нюансов, требующих соблюдения. Выполнение таких задач возможно только квалифицированными инженерами.

Литература

1. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. – М., 1987.
2. Баженов, Ю.М. Технология бетона/ Ю.М.Баженов. – М.: Высшая школа, 1978. – 455с.
3. <http://www.bibliotekar.ru>.

УДК 624.014

А.С. Зубрилов

Определение редуцированного сечения тонкостенного гнутого профиля при расчёте на устойчивость плоской формы изгиба

Применение холодногнутых оцинкованных профилей толщиной до 3 мм в качестве несущих конструкций в сооружениях самого разного назначения в настоящее время является актуальным ввиду высокой технологичности конструкций такого рода на этапе их изготовления и монтажа. Использование таких профилей в зданиях и сооружениях с небольшими нагрузками на покрытие позволяет получить значительный экономический эффект по сравнению с традиционными стальными конструкциями из горячекатаных и гнутых профилей. Основными задачами совершенствования стальных конструкций является уменьшение трудоёмкости их изготовления и монтажа, а также снижение металлоёмкости за счёт совершенствования существующих методик расчёта.

Первые сообщения об использовании тонкостенных гнутых профилей за рубежом относятся к середине XIX века. В России гнутые профили из тонколистовой стали впервые были применены в 1838 году.

Советские исследователи внесли большой вклад в развитие теории расчёта тонкостенных профилей – труды В.З. Власова, А.А. Уманского, Н.И. Безухова, А.А. Гвоздева, А.А. Ильюшина и Д.В. Бычкова стали основным пособием для исследователей и конструкторов в нашей стране и за рубежом при разработке конструкций из тонкостенных профилей.

Исследованию общей устойчивости плоской формы изгиба тонкостенных стержней посвящены работы: С.П. Тимошенко, В.З. Власова, Э.Л. Айрумяна.

В своих исследованиях В.З. Власов разработал общую теорию пространственной устойчивости тонкостенных стержней, из которой, как частный случай, следовали уравнения С.П. Тимошенко изгибно-крутильной устойчивости балок.

Существенного прогресса в решении задач устойчивости плоской формы изгиба тонкостенных стержней открытого профиля не происходит. Связано это с трудностями интегрирования уравнений устойчивости,

которые содержат переменные коэффициенты. По этой причине известны решения только для случаев, когда поперечная нагрузка вызывает лишь один закон изменения изгибающего момента по длине стержня. Под эти условия подводятся и задачи устойчивости при симметричной эпюре изгибающего момента.

При рассмотрении вопроса расчёта металлических тонкостенных конструкций с определением редуцированной площади профиля основным нормативным техническим документом в настоящее время является Еврокод 3. Основные положения расчёта редуцированной площади применимы для тонкостенных холодногнутох профилей с одинарным и двойным краевым отгибом (рис. 1).

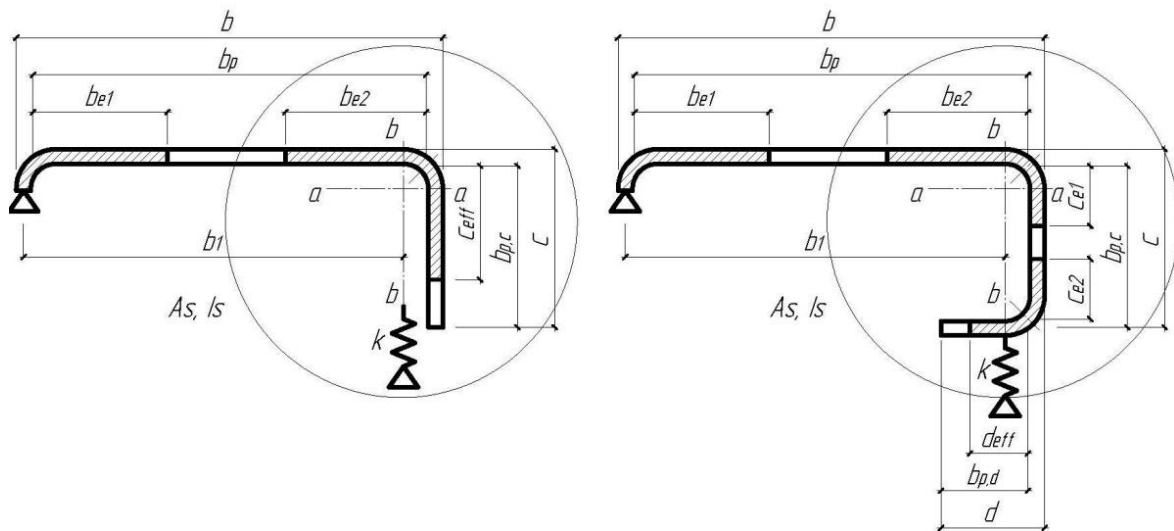


Рис.1. Увеличение жёсткости в результате перехода от одинарного отгиба к двойному

В связи с тем, что продольно сжатые участки тонкостенного профиля могут потерять местную устойчивость при напряжениях, не достигших предела текучести стали f_y расчётные геометрические характеристики сечения следует определять с учётом его редукции, т.е. снижения рабочей площади. Редуцирование поперечного сечения при местной потере устойчивости выполняется путём исключения из работы части сжатых элементов профиля с дальнейшим использованием в расчёте «эффективного» сечения.

Эффективная площадь поперечного сечения A_s краевого отгиба определяется по формулам: $A_s = t(b_{e2} + c_{eff})$ – для одинарного краевого отгиба и $A_s = t(b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff})$ – для двойного краевого отгиба, где: c_{eff} и d_{eff} – значения эффективных ширин определяются по формулам (1, 2):

$$c_{eff} = \rho b_{p,c}, \quad (1)$$

где ρ – понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины определяется по [1], с учетом коэффициента потери устойчивости k_σ .

$$d_{eff} = \rho b_{p,d}, \quad (2)$$

Существующие нормы [1] не учитывают действительную работу тонкостенных гнутых профилей. В Еврокоде 3 [2, 3] рассматривается определение редуцированной площади с учётом идеализации граничных условий пластин, составляющих поперечное сечение, а также с учётом распределения напряжений по сечению.

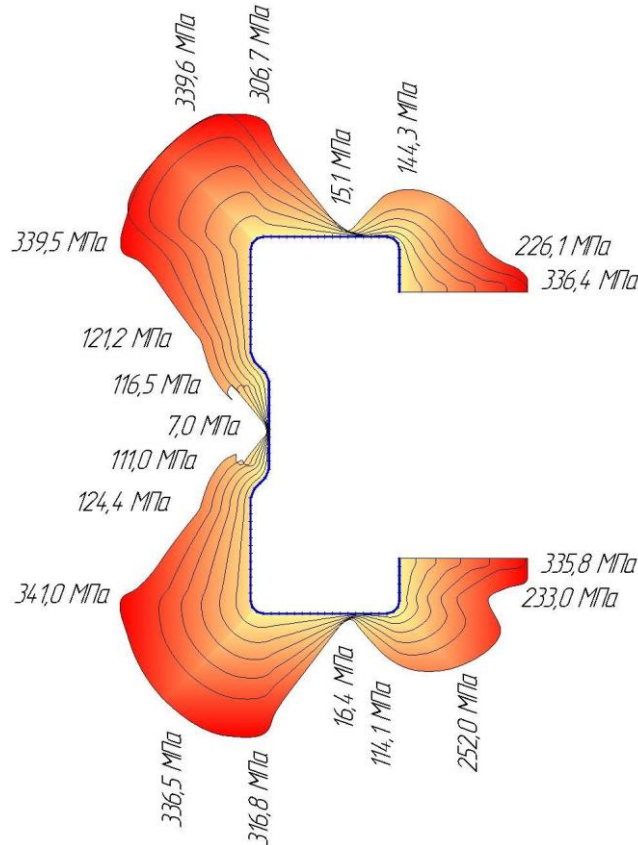


Рис.2. Эпюр эквивалентных напряжений в поперечном сечении профиля ПС-100-1,0

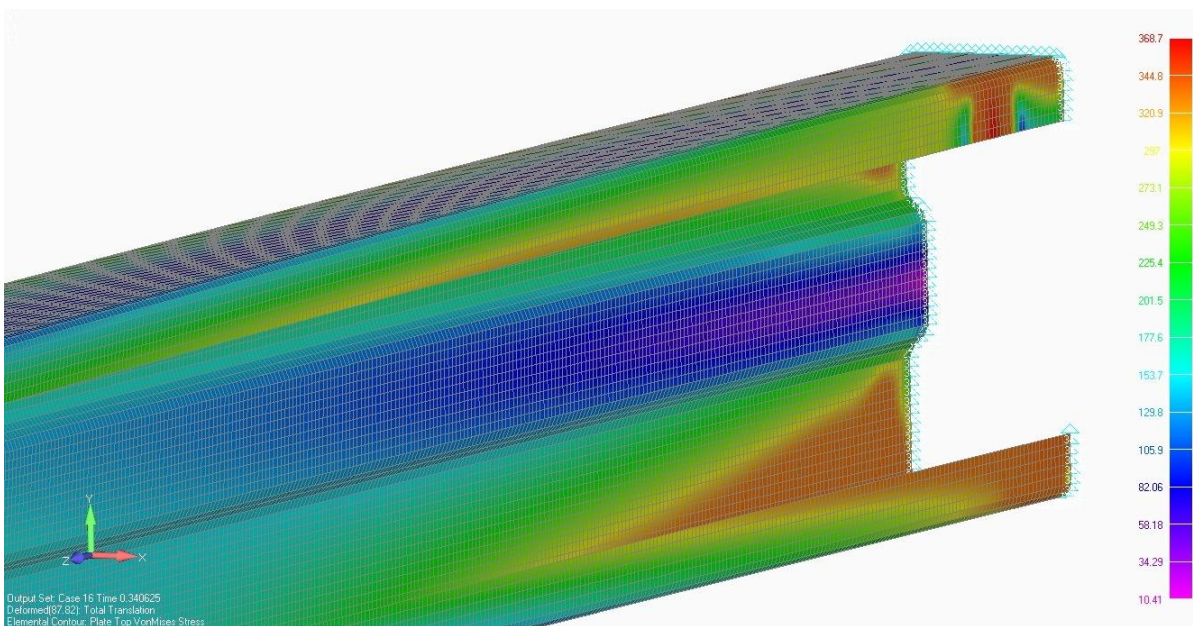


Рис. 3. Деформированная схема части расчётной модели профиля ПС-100-1,0 с элементом повышенной жёсткости, при расчёте на общую устойчивость

Одним из методов расчёта, позволяющих учесть действительную работу элементов, является численный метод, основанный на методе конечных элементов (МКЭ). Определение редуцированной площади тонкостенного гнутого стержня численным методом рассмотрено на примере пространственной конечно-элементной модели, рассчитанной с учётом физически-нелинейной работы материала.

В качестве поперечного сечения рассчитываемого стержня принят профиль ПС-100-1,0 с элементом повышенной жёсткости.

Характеристики материала, задаваемые в Nastran (безразмерные):

- модуль Юнга или модуль упругости: $E=210000$;
- модуль сдвига: $G=79300$;
- коэффициент Пуассона: $\nu=0,3$.

В качестве материала стержней принята сталь марки С345 со следующими расчётными характеристиками:

- предельное напряжение на растяжение: $R_y=345$;
- предельное напряжение на сдвиг: $R_s=200$.
- толщина элементов 1,0 мм.

К рассчитываемой модели приложена распределённая нагрузка по длине стержня к верхнему поясу. Величина нагрузки принята изначально $N = 2\ 810$ Н. Количество узлов, в которые передаётся нагрузка, составляет 12 767. Величина нагрузки в один узел соответственно 0,22 Н.

В результате линейного расчёта получено значение усилий, равное 1 194,0 Н. С целью определения возможной потери общей и местной устойчивости стенки и полок стержня от критической нагрузки выполнен нелинейный расчёт с учётом геометрической нелинейности и физически нелинейной работы материала. В результате нелинейного расчёта получено значение усилий, равное 368,7 Н, что соответствует потере общей устойчивости изогнутого стержня.

На основании сравнения результатов расчётов, выполненных по методике, приведённой в Еврокоде 3 [2, 3], и МКЭ, можно сделать следующие выводы:

- редуцированная площадь для рассматриваемого типа профиля, определённая по методике, изложенной в Еврокоде 3 [2, 3], составляет 26,7% от полной площади поперечного сечения;
- численный расчёт тонкостенного гнутого профиля на местную устойчивость с учётом нелинейных свойств материала показывает неравномерное распределение эквивалентных напряжений по поперечному сечению с исключением из работы участков сечения, удалённых от мест загиба.

Литература

1. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции: свод правил, актуализированная редакция СНиП II-23-81*: утв. Приказом Министерства

регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря № 791: дата введ. 20.05.2011. – М., 2011. – 177 с.

2. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3: Общие правила. Дополнительные правила для холодногнутых элементов и листов. CEN. – 2004. – 124 с. (EN 1993-1-3:2004 E).

3. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5: Пластинчатые элементы конструкций// Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2010. - 60 с. (ТКП EN 1993-1-5-2009 (02250)).

УДК 692.44

Н.М. Исаева

О выборе рациональных параметров односетчатых звездчатых куполов

Купола применяются в качестве несущих конструкций покрытий общественных и гражданских зданий (выставочных павильонов, спортивных сооружений и др.), промышленных зданий (сборочных цехов, складов и др.), сельскохозяйственных построек (оранжерей, теплиц и др.) и зданий специального назначения (лабораторных залов и др.). Из всего многообразия куполов наибольшее распространение получили сетчатые купола. Благодаря выразительному архитектурному виду, большим перекрываемым пролетам и малой массе такие покрытия по праву можно назвать перспективными конструкциями XXI века.

Оптимальное проектирование конструкций при учете всех конструктивных ограничений, нескольких критериев качества и нормативных требований – весьма громоздкая задача, и не всегда представляется возможность решить ее в полном объеме. Поэтому необходимо исследование относительной значимости различных факторов (критериев), с тем чтобы заранее можно было выявить ту группу параметров, колебание величин которых существенно влияют на технико-экономическую эффективность сооружения.

В сетчатых куполах такими параметрами, от которых в большой степени зависят их технико-экономические показатели, в первую очередь являются: стрела подъема или отношение стрелы подъема к диаметру и количество элементов, или длина стержневых элементов.

Из большого количества геометрических схем применяемых сетчатых куполов для выявления закономерностей веса принят купол с треугольной решеткой радиально-кольцевой схемой каркаса (звездчатый). Это выбор обусловлен, во-первых, простотой и четкостью геометрической схемы; во-вторых, возможностью применения этой схемы для покрытий

любой высоты. Кроме того, поскольку данная геометрическая схема обладает всеми качествами стержневых сетчатых куполов, то решения, полученные для данного купола, могут быть распространены на целый ряд других сетчатых куполов с различными геометрическими схемами [3].

Цель магистерской работы заключается в развитии методов расчета и упрощении подбора металлических сетчатых куполов на основе целенаправленных научных исследований с учетом современных строительных норм [1,2].

Задачами исследования являются:

- анализ конструктивных решений и результатов ранее проведенных исследований как отдельных элементов купольных покрытий, так и куполов в целом;
- разработка комплексной программы исследований металлических сетчатых куполов, позволяющей выявить необходимые закономерности и определить влияние отдельных факторов и их сочетаний на изменение массы купола;
- разработка рекомендаций по совершенствованию методов выбора конструктивной схемы рассматриваемых покрытий.

Практическое значение исследований заключается в совершенствовании процесса проектирования металлических сетчатых куполов. Разрабатываемая методика позволит проектировщику достаточно просто подобрать более экономичный купол по расходу материала в зависимости от величины пролета, стрелы подъема, количества элементов и др.

Для исследования закономерностей массы односетчатых звездчатых куполов выбран метод перебора вариантов с анализом полученных результатов.

Метод вариантного проектирования предполагает рассмотрение значительного числа куполов, отличающихся друг от друга одним и более параметрами.

Расчет одного варианта сетчатого купола выполняется в следующей последовательности:

- 1) выбор определяющих параметров для исследований;
- 2) составление расчетной схемы;
- 3) статический расчет;
- 4) конструктивный расчет;
- 5) определение технико-экономических показателей купола.

Этапы 2-4 выполняются с помощью программного комплекса SCAD, основанного на методе конечных элементов.

На основе данных, полученных для целого ряда куполов, определяются геометрические зависимости и аппроксимирующие формулы.

Для начального этапа определения закономерностей изменения массы односетчатых звездчатых куполов выбран купол диаметром 42 м с изменением отношения стрелы подъема к диаметру купола от 1/2 до 1/9.

Рассматривается действие следующих загружений на элементы рассматриваемых куполов: собственный вес купола; вес покрытия (кровли); снег на весь купол; снег на половину пролета купола. Нагрузки определены согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» [2].

Собственный вес купола задается равномерно распределенной нагрузкой непосредственно в SCAD без предварительных расчетов.

Вес кровли принимается равным в одном варианте 1 кН/м^2 , в другом принимается легкое покрытие – $0,15 \text{ кН/м}^2$.

Вес кровли и снеговые нагрузки задаются в узлы купола. Для этого предварительно были определены грузовые площади для каждого узла.

В связи со вступлением в силу СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» [2] произошли значительные изменения в задании снеговой нагрузки на купольные покрытия. Если в предыдущих работах, посвященных данной тематике, рассматривался только вариант равномерно распределенной нагрузки по купольному покрытию, то в настоящих действующих нормах для куполов с отношением стрелы подъема к диаметру купола, превышающим 0,05, рассматривается и вариант загрузки половины купола неравномерной снеговой нагрузкой. Значение этой нагрузки изменяется в зависимости от расстояния от центра купола до узла, к которому прикладывается нагрузка и от угла поворота между линией, соединяющей центр купола и рассматриваемый узел, и диаметральной линией.

В ходе исследований рассматривались оба варианта загрузки снеговой нагрузкой.

Все конструктивные элементы подбирались с учетом действующих нагрузок. Подбор сечений элементов производился с помощью постпроцессора программного комплекса SCAD – «Проверка сечений из металлопроката».

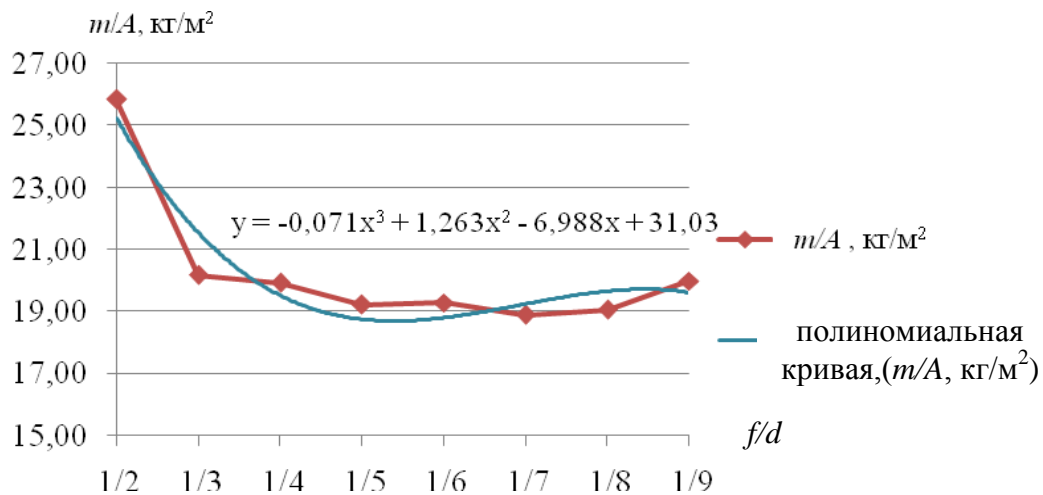
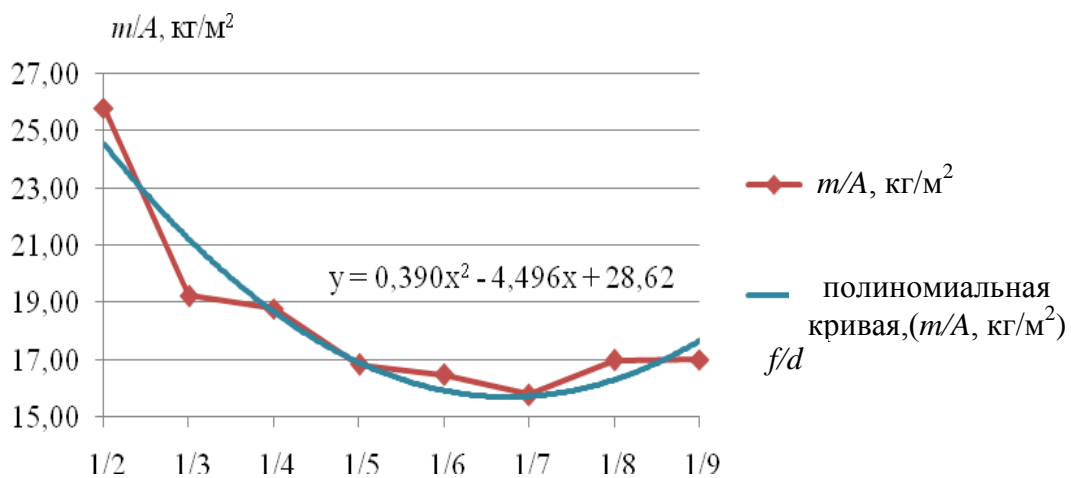
Постпроцессор предназначен для проверки несущей способности стержневых элементов стальных конструкций в соответствии с требованиями СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» [1].

После подбора сечений элементов куполов были определены реакции опор от собственного веса для каждого купола, на основе которых были получены удельные массы куполов, т.е. отношения массы куполов к перекрываемой площади m/A . Полученные результаты для куполов с отношением стрелы подъема к диаметру f/d от 1/2 до 1/9 при диаметре купола 42 м при двух разных значениях нагрузки от веса покрытия (кровли) приведены в табл. 1.

Масса купола диаметром 42 м в зависимости от стрелы подъема и веса покрытия

f/d	Удельная масса купола, m/A , кг/м ²	
	при весе покрытия – 1 кН/м ²	при весе покрытия – 0,15 кН/м ²
1/2	25,84	25,80
1/3	20,18	19,23
1/4	19,93	18,79
1/5	19,22	16,82
1/6	19,28	16,48
1/7	18,89	15,77
1/8	19,06	16,98
1/9	20,00	17,01

В графической форме полученные результаты масс куполов показаны на рис. 1,2.

Рис. 1. График зависимости удельной массы купола диаметром 42 м от стрелы подъема (вес покрытия – 1 кН/м²)Рис.2. График зависимости удельной массы купола диаметром 42 м от стрелы подъема (вес покрытия – 0,15 кН/м²)

Для полученных графиков построены аппроксимирующие полиномиальные кривые, которые наиболее близко расположены к полученным значениям, при этом не содержат полиномов больших порядков, которые усложняют процесс вычислений.

Таким образом установлено, что для купола диаметром 42 м при весе покрытия 1 кН/м^2 наиболее выгодным является отношение f/d от $1/4$ до $1/8$, а при весе покрытия $0,15 \text{ кН/м}^2$ – отношение f/d от $1/5$ до $1/7$.

Дальнейшие исследования методом перебора вариантов с анализом полученных результатов помогут выявить закономерности изменения массы односетчатых звездчатых куполов не только при переменной стреле подъема, но и при изменении других параметров куполов.

Литература

1. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции / Госстрой России. – М., 2011.
2. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия / Госстрой России. – М., 2011.
3. Молев, И. В. Стержневые звездчатые купола. Техничко – экономический анализ : учеб. пособие/ И. В. Молев. – Горький: ГИСИ им. В. П. Чкалова, 1990. – 76 с.

УДК 624.074.352

И.В. Клиньшов

Формообразование квадратных в плане сетчатых сводов двойкой кривизны

Проектирование любой конструкции в строительстве начинается с определения ее геометрических параметров. При проектировании сетчатых конструкций следующим после определения глобальных размеров (пролета, стрелы подъема и т.п.), ответственным шагом является разрезка поверхности – разбиение поверхности на ячейки. На этом этапе, который в различных источниках также называется аппроксимацией или триангуляцией, на выбранную поверхность наносят сеть геометрических линий – осей стержней будущего каркаса конструкции.

Для сетчатых куполов и цилиндрических сетчатых сводов разработано довольно большое количество способов разрезки, в то время как для сетчатых сводов двойкой кривизны этот вопрос практически не проработан. В данной статье рассмотрены способы аппроксимации поверхностей квадратных в плане сетчатых сводов двойкой кривизны.

Исходной поверхностью рассматриваемых сводов является квадратная в плане выпуклая оболочка. Одной из наиболее простых форм

для ее получения является известная в архитектуре форма парусного свода (рис. 1), который образуется отсечением верхней центральной части сферической поверхности четырьмя попарно ортогональными вертикальными плоскостями или призмой.

Очевидно, что аппроксимировать эту или иную поверхность стержневой сетью можно бесконечным количеством способов. Поэтому для этого процесса и, соответственно, его конечного результата необходимо определить критерии, по которым бы оценивалась удачность того или иного способа разрезки:

- применение в будущей конструкции как можно меньшего количества типоразмеров стержневых и узловых элементов;
- эффективность способа разрезки с точки зрения работы системы под нагрузкой, то есть ориентация стержней в направлении передачи усилий, обеспечение точной передачи усилий, обеспечение максимально равномерного распределения усилий между стержнями и т.п.

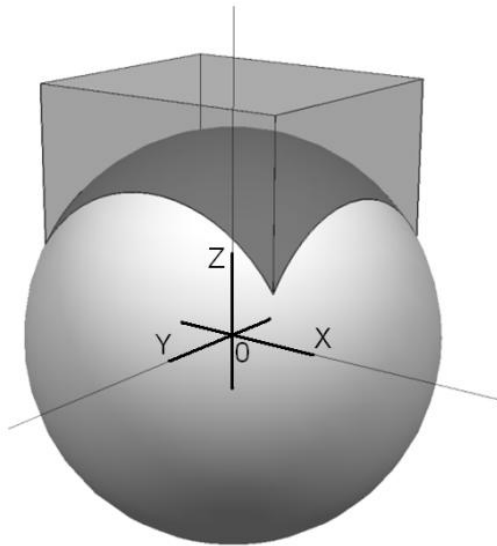


Рис. 1. Парусный свод

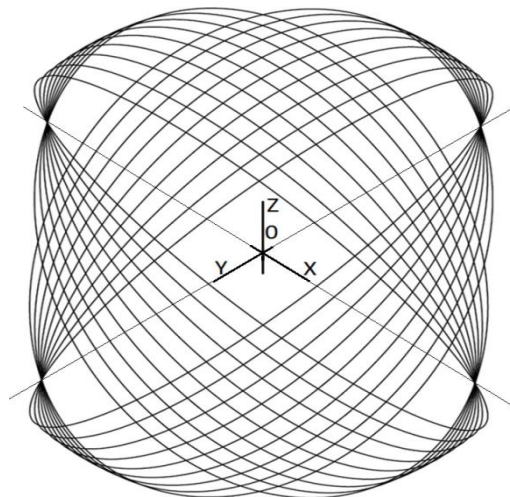


Рис.2. Исходные окружности

Итак, рассмотрим несколько способов аппроксимации поверхности парусного свода или близких к ней поверхностей, похожих на парусный свод.

Первый способ – «метод поворота окружностей в пространстве» – основан на меридиональной разрезке. За основу берутся две окружности, лежащие во взаимоперпендикулярных плоскостях XOZ и YOZ , имеющие общий центр в точке O , одинаковый радиус и, соответственно, принадлежащие одной сфере (рис. 2). Поворотом на одинаковый угол этих окружностей вокруг осей OX и OY в положительном и отрицательном направлениях получается сеть четырехугольных ячеек. Соединяя точки пересечения окружностей-меридианов отрезками получаем каркас конструкции в осях стержней.

Полученная сеть хотя и является сферической, но форма ее отличается от парусного свода (рис. 3). В этом случае, как видно из рис. 3, количество типоразмеров стержневых и узловых элементов достаточно велико. При условии поворота окружности, лежащей в одной из двух исходных плоскостей, на одинаковый угол в каждом направлении n раз количество типоразмеров стержневых элементов равняется $n(n+1)$. Количество типоразмеров узловых элементов $-(n+1)^2$, общее количество ячеек свода $-4n^2$.

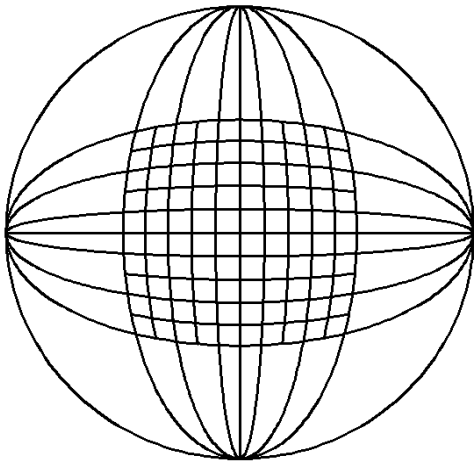


Рис. 3. Полученная сферическая сеть

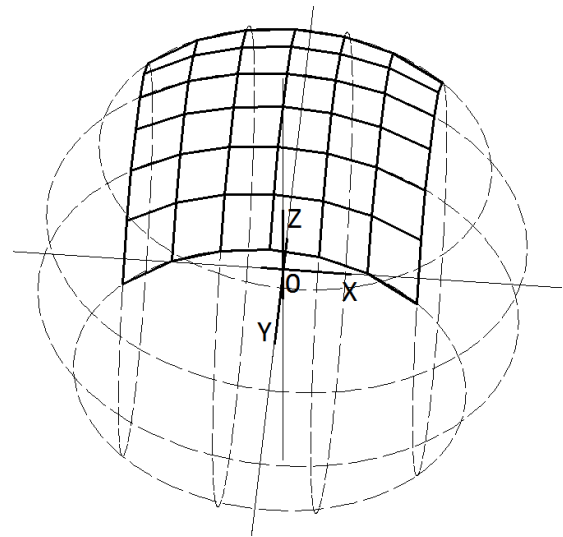


Рис.4. Основа каркаса

Следующим способом, очевидно вытекающим из формы парусного свода, является способ «секущих плоскостей». В этом случае основой каркаса служит сеть окружностей, получающихся в результате пересечения поверхности сферы вертикальными плоскостями, расположенными перпендикулярно друг другу и параллельными плоскостям XOZ и YOZ (рис. 4). Здесь, по причине разных радиусов окружностей, получающихся при сечении сферы на разных удалениях от плоскостей ее симметрии (XOZ и YOZ), количество типоразмеров стержневых и, соответственно, узловых элементов довольно велико. Как и в случае меридионального деления, количество типоразмеров стержневых элементов равняется $n(n+1)$, узловых элементов $-(n+1)^2$, общее количество ячеек свода $-4n^2$, где n – количество сечений параллельными плоскостями с одной стороны от плоскости симметрии сферы.

Еще одним способом получения квадратной в плане сферической оболочки является способ параллельного переноса окружностей, основанный на методе построения сетей Чебышева. Исходными в данном случае, как и в случае меридионального деления, являются две окружности, лежащие в двух взаимоперпендикулярных плоскостях XOZ и YOZ , имеющие общий центр в точке O и одинаковый радиус (рис. 5). Однако в данном способе каждая окружность не поворачивается, а переносится параллельно вдоль окружности, лежащей в перпендикулярной

плоскости, на равные расстояния. Для перпендикулярного направления выполняется та же операция. Пересечением окружностей, лежащих в перпендикулярных плоскостях, получается система перекрестных арок, образующая сеть четырехугольных ячеек. Соединяя точки пересечения арок отрезками, получаем каркас конструкции в осях стержней.

Стоит отметить, что используемая в данном случае поверхность не является сферической, в отличие от первых двух случаев. Однако поверхность эта при большом пролете свода относительно его стрелы подъема достаточно точно повторяет сферическую поверхность, и можно предположить, что разница эта играет весьма малое значение.

Полученная таким образом конструкция имеет все стержни одной длины, то есть только один типоразмер стержневых элементов, в отличие от предыдущих способов формообразования. При этом все смежные стержни одной арки пересекаются под одинаковыми углами – имеют одинаковый узел соединения. Однако за счет пересечения в одном узле арок разных направлений количество узловых элементов, как и в предыдущих случаях, равно. Общее количество ячеек свода – $4n^2$, где n – количество переносов окружности в одном направлении. Кроме того, получаемые таким образом четырехугольные ячейки, в отличие от двух других способов формообразования, являются плоскими, как ограниченные четырьмя попарно параллельными отрезками.

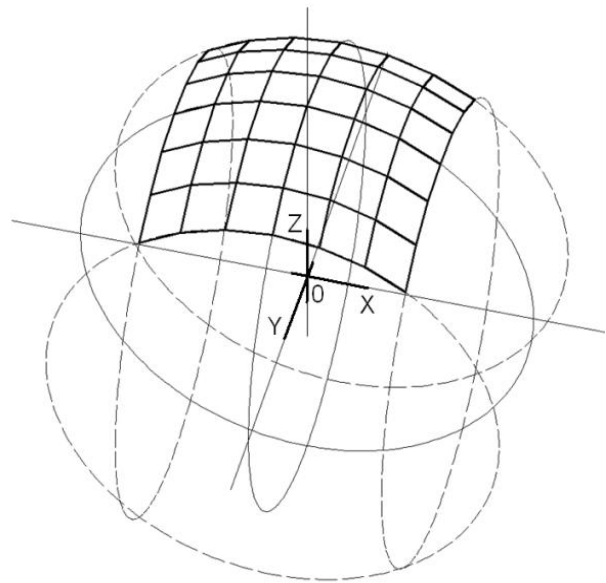


Рис. 5

Таким образом, по критерию количества типоразмеров оптимальным из трех способов аппроксимации является способ параллельного переноса окружностей. В этом случае в конструкции применяется всего один типоразмер стержневых элементов, тогда как в двух других – $n(n+1)$, типоразмеров, при общем количестве ячеек во всех конструкциях $4n^2$. При этом способ параллельного переноса исходных окружностей позволяет получить плоские ячейки в сети свода.

Однако количество типоразмеров узловых элементов во всех системах одинаково и равняется $(n+1)^2$. Можно предположить, что для сводов двойкой кривизны, в отличие от цилиндрических сводов, добиться меньшего количества типоразмеров узловых элементов невозможно как раз по причине двойной кривизны.

Наглядное объяснение этого предположения можно найти в конструкции свода, получаемого параллельным переносом окружностей, узловые элементы которого для отдельных плоских арок являются одинаковыми. Однако за счет большого количества различных пересечений арок разных направлений, пространственные элементы становятся разными для каждого из мест пересечения арок в одной четверти конструкции свода. Таким образом, двоякая кривизна делает невозможным применение в конструкции одного «универсального» типоразмера узлового соединения.

Литература

1. Горев, В.В., Металлические конструкции. В 3 т. Т. 2. Конструкции зданий: Учеб. для строит. вузов./ В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Г.И. Белый и др.; под ред. В.В. Горева. – М.: Высш. шк. – 1999. – 528 с.: ил.
2. Трущев, А.Г., Пространственные металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов./ А.Г. Трущев. – М.: Стройиздат. – 1983. – 215 с.: ил.
3. Журавлёв, А.А., Пространственные деревянные конструкции./ А.А. Журавлев, Г.Б. Вержбовский, Н.Н. Еременко. – Ростов–на–Дону: ОАО ИПФ «Малыш». – 2003. – 518 с.: ил.
4. Попов, И.Г., Цилиндрические стержневые системы/ И.Г. Попов. – Ленинград.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре. – 1952. – 112 с.: ил.

УДК 539.3

Д.А. Ламзин

К методике определения параметров и констант математических моделей динамического деформирования хрупких материалов

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) строительных конструкций в настоящее время широко применяются численные методы, реализованные в современных программно-вычислительных комплексах, и в частности метод конечных элементов (МКЭ). Численное моделирование позволяет в достаточно короткие сроки проводить довольно достоверные расчеты НДС конструкций путем изменения расчетных схем и использования различных моделей деформирования материалов. Однако поведение моделируемой конструкции в процессе ее нагружения и работы в основном определяется заложенными в расчете уравнениями математических моделей и константами материалов.

В последнее время нередко стали возникать крупномасштабные трагедии, сопровождающиеся интенсивными ударными и взрывными

воздействиями. Такие аварии приносят не только значительный материальный ущерб, но и приводят к многочисленным человеческим жертвам. Поэтому задача надежного проектирования объектов, обеспечение прочности и устойчивости конструктивных элементов при различного рода динамических воздействиях является крайне важной.

Учитывая все выше сказанное необходимо отметить, что проблемы идентификации определяющих соотношений (т. е. оснащения их необходимыми параметрами и константами), использующихся для решения динамических задач, и их верификации (проверки работоспособности) становятся значимыми и актуальными. Современным подходом к решению этих задач является применение экспериментально-теоретического метода, основанного на анализе натуральных и численных экспериментов по динамическому деформированию материалов, минимизации расхождения их результатов с целью уточнения параметров и констант математических моделей, а также выявления особенностей динамических процессов.

В связи с этим в данной работе на основании экспериментальных данных, полученных при испытании мелкозернистого бетона с помощью модификации методики Кольского – сжатия в условиях одноосной деформации, определены константы модели бетона Джонсона-Холмквиста и проведено численное моделирование лабораторных экспериментов. Сравнение результатов натуральных испытаний с результатами численного моделирования показало их хорошее соответствие.

1. В модифицированной методике Кольского – сжатие в условиях одноосной деформации [1], испытываемый образец располагается между торцами мерных стержней в ограничивающей его радиальную раздачу жесткой обойме (рис. 1).

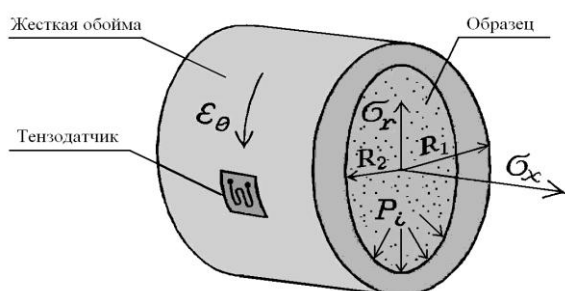


Рис. 1. Схема НДС образца, заключенного в обойму

В таких условиях радиальной деформацией образца по сравнению с продольной можно пренебречь и считать деформированное состояние образца одномерным, а напряженное состояние – объемным. Таким образом, главные компоненты тензоров напряжений и деформаций в образце будут иметь вид:

$$\sigma_1 = \sigma_x; \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r; \varepsilon_1 = \varepsilon_x; \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,$$

где σ_x и ε_x – продольные напряжения и деформации, σ_r – радиальные напряжения в образце.

По импульсам деформации мерных стержней ($\varepsilon^T(t)$ и $\varepsilon^R(t)$) можно определить величины продольного напряжения и деформации, а также скорости продольной деформации образца по формулам:

$$\sigma_x(t) = \frac{EA}{A_s^0} \varepsilon^T(t), \quad (1)$$

$$\varepsilon_x(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon^R(t) \cdot dt, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_x(t) = -\frac{2C}{L_0} \varepsilon^R(t), \quad (3)$$

где E , A и C – соответственно модуль Юнга, площадь поперечного сечения и скорость звука в стержнях, A_s^0 и L_0 – соответственно площадь сечения и длина образца.

Величину радиальных напряжений в образце можно определить по импульсу, зарегистрированному на ограничивающей обойме $\varepsilon_\theta(t)$:

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{2R_2^2} \left[E \left(R_1^2 - R_2^2 \right) \varepsilon_\theta(t) \right], \quad (4)$$

где E – модуль Юнга материала обоймы, R_1 и R_2 – соответственно наружный и внутренний радиусы обоймы.

Давление P , объемная деформация θ , интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i в образце определяются следующим образом:

$$P(t) = \frac{\sigma_x(t) + 2\sigma_r(t)}{3}, \quad (5)$$

$$\theta(t) = \varepsilon_x(t), \quad (6)$$

$$\sigma_i(t) = \sigma_x(t) - \sigma_r(t), \quad (7)$$

$$\varepsilon_i(t) \approx \frac{2}{3} \varepsilon_x(t), \quad (8)$$

2. Математическая модель бетона Джонсона-Холмквиста (*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE) [2-5] применяется для моделирования материала, который испытывает большие деформации с высокой скоростью и высокое давление. Эквивалентная прочность в данной модели выражается в виде функции давления, скорости деформации и величины повреждения. Давление выражается в виде функции объемной деформации и включает эффект постоянного раздавливания. Повреждение накапливается как функция объемной пластической деформации, эквивалентной пластической деформации и давления.

Нормализованное, то есть отнесенное к квазистатической прочности при одноосном сжатии f'_c , эквивалентное напряжение (интенсивность напряжений) задается формулой

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}] [1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*], \quad (9)$$

где A – нормализованная когезионная прочность,

D – параметр разрушения ($D=0$ – материал без повреждений; $D=1$ – материал полностью разрушен),

B – нормализованное упрочнение под действием давления,

N – показатель степени упрочнения под действием давления,

C – коэффициент скорости деформации,

P^* – нормализованное давление, то есть давление, отнесенное к квазистатической прочности при одноосном сжатии f'_c ,

$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ – безразмерная скорость деформации (обычно $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$).

В этой модели повреждение накапливается как за счет эквивалентной пластической деформации, так и объемной пластической деформации, при этом

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \theta_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}}, \quad (10)$$

где $\Delta \varepsilon_p$ и $\Delta \theta_p$ – эквивалентная пластическая деформация и объемная пластическая деформация соответственно, D_1 и D_2 – константы материала, а T^* – нормализованное максимальное давление растяжения, то есть отнесенное к квазистатической прочности при одноосном сжатии f'_c .

Зависимость давления P от объемной деформации θ разделяется на три участка: участок 1 – упругое деформирование; участок 2 – пластическое деформирование, смятие пор и пустот; участок 3 – разгрузка, материал без пор и пустот. Давление для совершенно плотного материала определяется соотношением

$$P = K_1 \bar{\theta} + K_2 \bar{\theta}^2 + K_3 \bar{\theta}^3, \quad (11)$$

где K_1 , K_2 и K_3 – константы материала, а модифицированная объемная деформация $\bar{\theta}$ задается выражением

$$\bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_{lock}}{1 + \theta_{lock}}, \quad (12)$$

где θ_{lock} – предельная объемная деформация.

Испытаниям подверглись образцы мелкозернистого бетона со следующим соотношением компонентов: цемент М500 – 758 кг/м³, вода – 417 кг/м³, песок – 909 кг/м³. Крупность заполнителя составляла 1,25-2,5 мм. Статическая прочность бетона на сжатие по результатам испытаний кубов с длиной ребра 70 мм составила 33,8 МПа и была принята за f'_c .

В результате серии проведенных испытаний таблеток диаметром ~ 20 мм и длиной ~ 10 мм на динамическое сжатие в условиях одноосной деформации был выбран характерный эксперимент для определения параметров модели и численного моделирования.

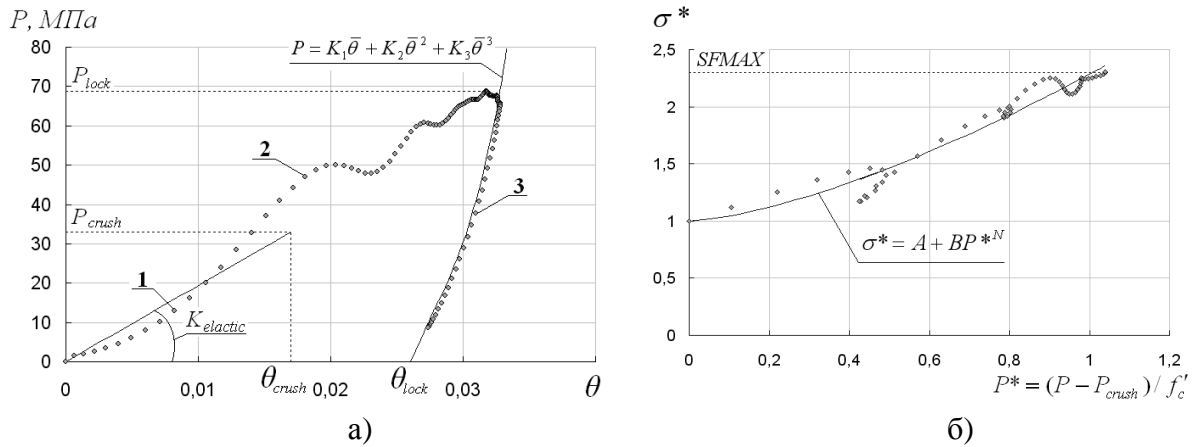


Рис. 2. Зависимости $P \sim \theta$ (а) и $\sigma^* \sim P^*$ (б): маркеры – опытные данные, сплошная линия – аппроксимация

Для определения постоянных модели Джонсона-Холмквиста необходимо знание зависимостей давления от объемной деформации и нормализованной интенсивности напряжений от нормализованного давления. Динамическая диаграмма деформирования (маркеры на рис. 2 а) в осях $P \sim \theta$ была разбита на три участка. Участок 1 от 0 до P_{crush} характеризует упругое поведение материала. Давление раздавливания принято как $P_{crush} = 33$ МПа при $\sigma_i = \sigma_T = f'_c$. Экспериментальные точки этой части диаграммы аппроксимировались линейной функцией, тангенс угла наклона которой принимался за модуль объемной деформации $K_{elastic} = 1940$ МПа, а объемная деформация раздавливания $\mu_{crush} = P_{crush} / K_{elastic} = 0,017$. По формулам теории упругости был определен модуль сдвига $G = 1455$ МПа, принимался коэффициент Пуассона для бетона $\nu = 0,2$ [6]. Участок 2 от P_{crush} до P_{lock} характеризует пластическое поведение материала, когда происходит сплющивание полостей и пустот в бетоне. Предельное давление $P_{lock} = 69$ МПа взято как максимальное давление на диаграмме. Участок 3 характеризует разгрузку материала. Ниспадающая ветвь диаграммы в этом случае была аппроксимирована зависимостью (11) со следующими значениями параметров: $K_1 = 8,205 \cdot 10^3$ МПа, $K_2 = -7,373 \cdot 10^5$ МПа, $K_3 = 1,623 \cdot 10^8$ МПа, $\theta_{lock} = 0,026$.

Зависимость нормализованной интенсивности напряжений от нормализованного давления для пластического поведения материала, полученная при испытании бетона, показана маркерами на рис. 2 б. Поскольку в данной работе не исследовалось влияние скорости деформации, коэффициент C был принят равным нулю. Экспериментальные точки были аппроксимированы функцией вида (9) при $C = 0$ со следующими значениями параметров: $A = 1$; $B = 1,284$; $N = 1,467$ ($A = \sigma^* = \sigma_T / f'_c = 1$ при $P^* = 0$). В качестве критерия разрушения принята нормализованная максимальная прочность $SFMAX = 2,3$ как максимальное значение на диаграмме.

В данной работе накопление повреждений в материале учитывалось выше при определении параметров модели, поэтому константы материала $D_1=D_2=0$. Величина пластической деформации перед разрушением $EFMIN$ была принята 0,002 [6]. Максимальное гидростатическое давление при растяжении было принято $T=P_{crush}/20=1,7$ МПа, а массовая плотность материала – 2200 кг/м³.

Результаты. С целью проверки достоверности определенных параметров и при необходимости их уточнения проведено численное моделирование эксперимента по динамическому деформированию образца, заключенного в обойму в ППП LS-DYNA. Для ударника, мерных стержней и обоймы, изготовленных из дюралюминиевого сплава, была принята модель упругого изотропного материала со следующими характеристиками: плотность $\rho=2640$ кг/м³, модуль Юнга $E=70$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. Моделирование проводилось в осесимметричной постановке. Фрагмент КЭ модели приведен на рис. 3.

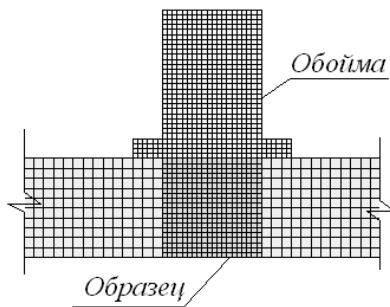


Рис. 3. Фрагмент КЭ модели

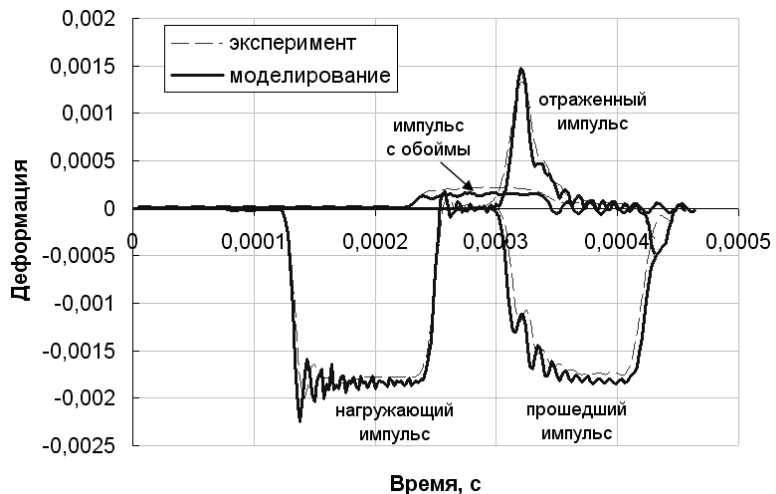


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных импульсов деформаций

Сравнение расчетных и экспериментальных импульсов деформаций мерных стержней и ограничивающей обоймы приведено на рис. 4. Видно, что модель Джонсона-Холмквиста с заданными константами достаточно хорошо описывает поведение мелкозернистого бетона в данных условиях динамического нагружения.

Таким образом проведено экспериментальное исследование и численное моделирование динамического деформирования мелкозернистого бетона. Получено хорошее согласование экспериментальных данных с результатами численного расчета.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 12-08-31337). Автор выражает благодарность Абрамову А.В. за помощь в проведении численных расчетов с использованием ППП LS-DYNA и Шалимову В.Н. за проведение динамических испытаний.

Литература

1. Брагов, А.М. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов/ А.М.Брагов, А.К.Ломунов, Г. В. Пандурин, Г.М. Грушевский // Прикл. механика и технич. физика. – 1995. – Т.36, № 3. – С. 179-186.
2. LS-DYNA. Keyword user's manual. V. II. March 2001. Version 960 (перевод).
3. LS-DYNA. Keyword user's manual. V. I. June 2009. Version 971.
4. Holmquist, T.J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures/ T.J.Holmquist, G.R. Johnson, W.H. Cook// Proceedings 14th International Symposium on Ballistics. – Quebec, Canada, 1993. – P. 591-600.
5. Christopher S. Meyer. Development of geomaterial parameters for numerical simulations using the Holmquist-Johnson-Cook constitutive model for concrete. Final report/ Christopher S. Meyer. – 2011. – 24 p.
6. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: Общий курс: учеб. для вузов/ В.Н.Байков, Э.Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 5-е изд., перераб. и доп. – 767 с.

УДК 624.011.2

Д.М. Лобов, А.В. Тихонов

Сравнительный анализ несущей способности изгибаемых деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при различном варианте армирования

Проведен сравнительный анализ несущей способности деревянных элементов, при различных вариантах армирования углеродным волокном, подверженных статическому изгибу. Углеродное волокно применяется в качестве элемента внешнего армирования и наносится на нижнюю кромку элемента, в зону растягивающих напряжений. Сцепление композита с поверхностью деревянных конструкций осуществляется при помощи эпоксидного клея.

В данной статье рассматривается изменение нормальных и касательных напряжений по длине анализируемых изгибаемых деревянных элементов и производится сравнение несущей способности деревянного элемента без усиления с несущей способностью деревянных элементов, усиленных углеродным волокном с постоянным и переменным армированием по длине. Схема усиления рассматриваемых элементов приведена на рисунке 1.

Методика расчета деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, основана на методике расчета армированных деревянных конструкций.

Схема элемента без усиления

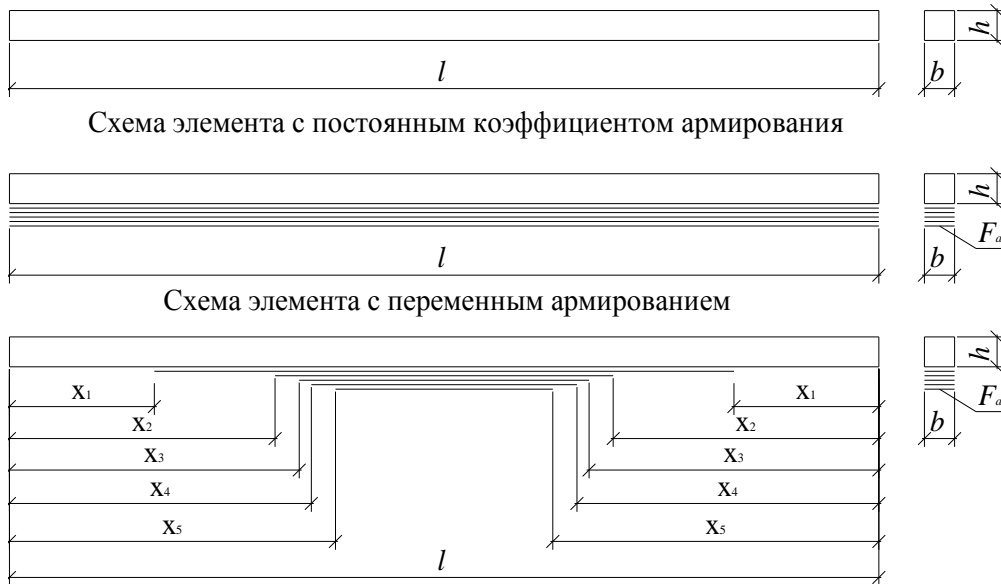


Рис. 1. Схема усиления деревянных элементов

Формула для определения нормальных напряжений в древесине при статическом изгибе элемента, усиленного углеволокном, будет иметь вид:

$$\sigma = \frac{M}{(b \cdot h^2/6)} \cdot \frac{1 + 2 \cdot \mu \cdot n}{1 + 4 \cdot \mu \cdot n} = \sigma_d \cdot \beta_w \quad (1)$$

где $\sigma_d = \frac{M}{(b \cdot h^2/6)}$ – формула для определения нормальных напряжений в древесине не усиленного элемента; $\beta_w = \frac{1+2 \cdot \mu \cdot n}{1+4 \cdot \mu \cdot n}$ – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокно в качестве элемента внешнего армирования. $\mu = F_a / (b \cdot h)$ – коэффициент армирования поперечного сечения конструкции; $n = E_a / E_d$ – отношение модулей упругости элемента усиления и древесины

Формула для определения касательных напряжений в нейтральном слое древесины при статическом изгибе элемента, усиленного углеволокном, будет иметь вид:

$$\tau_{д.н.сл.} = \frac{Q \cdot S'_{бр}}{I_{бр} \cdot b_{расч}} \cdot \frac{(1 + 2 \cdot \mu \cdot n)^2}{(1 + \mu \cdot n) \cdot (1 + 4 \cdot \mu \cdot n)} = \tau_d \cdot \beta_{н.сл.} \quad (2)$$

где $\tau_d = \frac{Q \cdot S'_{бр}}{I_{бр} \cdot b_{расч}}$ – формула для определения касательных напряжений в древесине в уровне нейтрального слоя неусиленного элемента; $\beta_{н.сл.} = \frac{(1+2 \cdot \mu \cdot n)^2}{(1+\mu \cdot n) \cdot (1+4 \cdot \mu \cdot n)}$ – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокна в качестве элемента внешнего армирования.

Формула для определения касательных напряжений в уровне клевого шва при статическом изгибе элемента усиленного углеволокном будет иметь вид:

$$\tau_{\text{к.ш.}} = \frac{Q \cdot S'_{\text{бр}}}{I_{\text{бр}} \cdot b_{\text{к.ш.}}} \cdot \frac{4 \cdot \mu \cdot n}{1 + 4 \cdot \mu \cdot n} = \tau_{\text{д}} \cdot \beta_{\text{к.ш.}} \quad (3)$$

где $\beta_{\text{к.ш.}} = \frac{4 \cdot \mu \cdot n}{1 + 4 \cdot \mu \cdot n}$ – коэффициент, учитывающий включение в работу углеволокна в качестве элемента внешнего армирования.

При первом варианте усиления, углеродное волокно наносится постоянным слоем по всей длине. Второй вариант усиления позволяет экономить армирующий материал. Данный способ армирования заключается в изменении коэффициента армирования таким образом, чтобы нормальные напряжения в любом сечении балки были равны нормальным напряжениям в расчетном сечении в середине пролета.

$$\sigma_x = \sigma_{\text{ср}}. \quad (4)$$

Таким образом, формула изменения коэффициента армирования по длине изгибаемого элемента выразится формулой:

$$\mu_x = \frac{4 \cdot x \cdot (1 - x) - l^2 \cdot \beta_{\text{ср}}}{4 \cdot n \cdot (l^2 \cdot \beta_{\text{ср}} - 2 \cdot x \cdot (1 - x))} \quad (5)$$

Изменение коэффициента армирования по длине для балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, с постоянным и переменным армированием, приведены на рис. 2.

Максимальное значение коэффициента армирования для балки с переменным армированием, соответствует сечению с максимальным изгибающим моментом, в середине пролета балки. При приближении к опорам значение изгибающего момента уменьшается, соответственно значение коэффициента армирования также уменьшается.

Зона отрицательных значений коэффициента не требует внешнего армирования для обеспечения прочности балки.

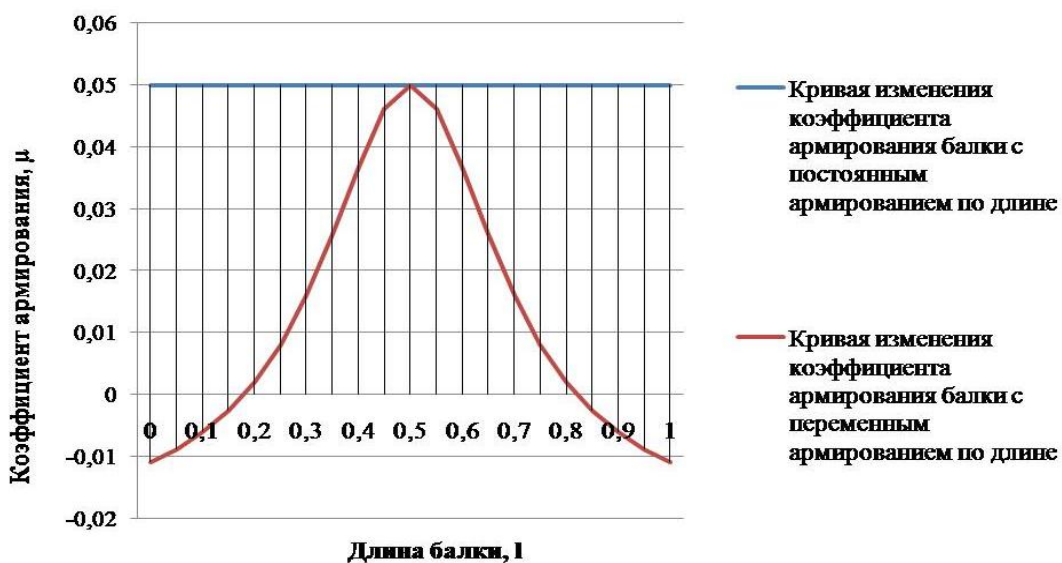


Рис. 2. Изменение коэффициента армирования по длине изгибаемых элементов

По формуле (1) строятся графики изменения нормальных напряжений по длине изгибаемого элемента (рис. 3), при этом коэффициент армирования для элемента без усиления принимается равным нулю. Для элемента с постоянным армированием – $\mu = \text{const}$, для элемента с переменным армированием – по формуле (4).

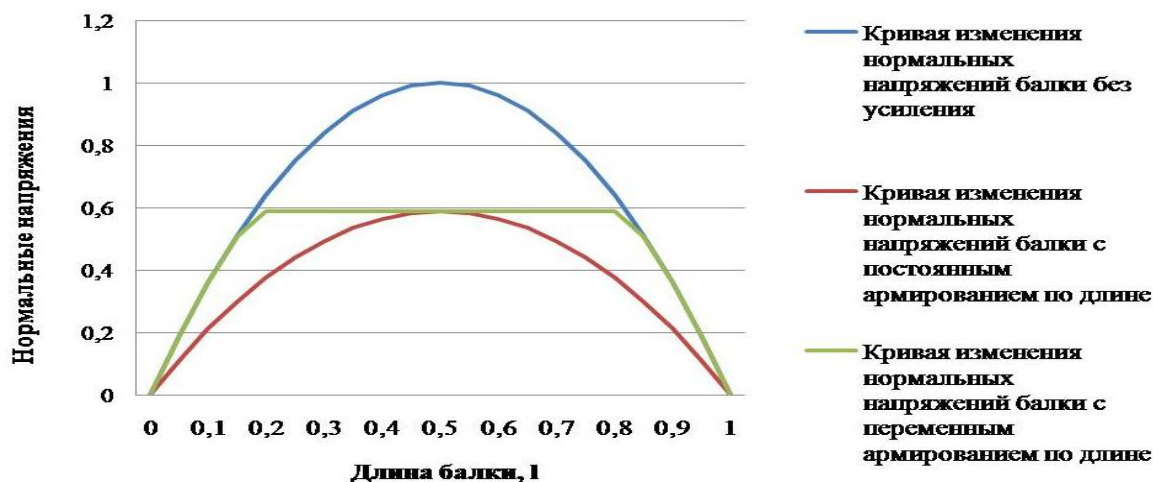


Рис. 3. Изменение нормальных напряжений по длине изгибаемых элементов

По графику изменения нормальных напряжений по длине элемента видно, что балка с переменным армированием является равнопрочной по нормальным напряжениям, балке с постоянным армированием. Кривая изменения нормальных напряжений балки с переменным армированием имеет прямолинейный участок, т.к., приближаясь к опоре, уменьшается не только изгибающий момент, но и момент сопротивления.

При усилении деревянных элементов углеродным волокном несущая способность по нормальным напряжениям увеличивается до 40%, в зависимости от коэффициента армирования в расчетном сечении балки.

Данная степень усиления является оптимальной, т.к. при проектировании усиления несущая способность неусиленной конструкции должна быть достаточной для восприятия постоянной и ограниченной временной нагрузки в случае повреждения системы усиления при пожаре и от других причин.

Увеличение прочности на действие скалывающих напряжений в уровне нейтрального слоя древесины и в уровне клеевого шва элемента усиленного углеволокном происходит на 5-10%.

Появившийся резерв прочности можно использовать, увеличив приложенную равномерно распределенную нагрузку q , действующую на балку, также порядком на 40%.

По формуле (2) строим графики изменения касательных напряжений в уровне нейтрального слоя древесины (рис. 4). Для элемента без усиления кривая изменения касательных напряжений строится от начальной нагрузки q , при этом коэффициент армирования $\mu = 0$. Для элементов, усиленных углеволокном, кривые изменения строятся от увеличенной

нагрузки q' . При этом для балки с постоянным армированием $\mu = \text{const}$, а для балки с переменным армированием коэффициент армирования μ принимается по формуле (5).

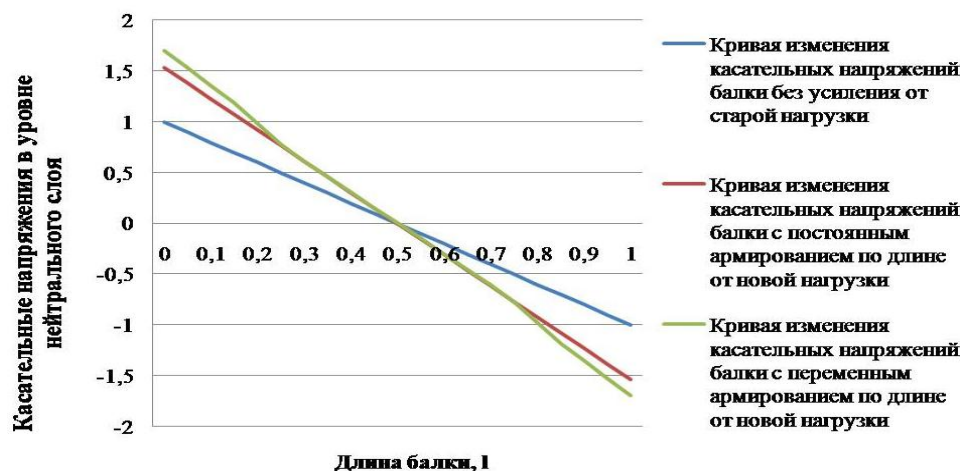


Рис. 4. Изменение касательных напряжений в уровне нейтрального слоя по длине изгибаемых элементов

По формуле (3) аналогичным способом строим графики изменения касательных напряжений в уровне клеевого шва (рис. 5).

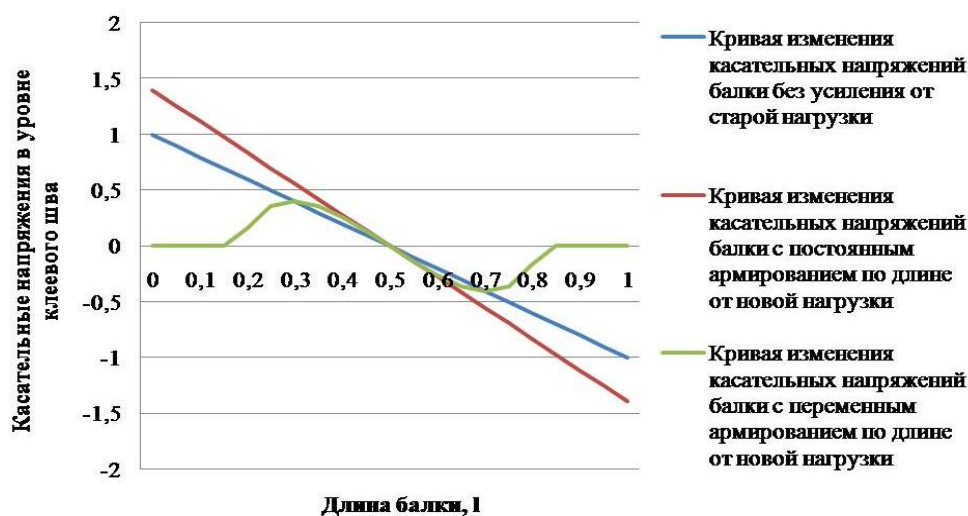


Рис. 5. Изменение касательных напряжений в уровне клеевого шва по длине изгибаемых элементов

По графикам рис. 5, 6 видно, что в усиленных элементах касательные напряжения в уровне нейтрального слоя, от нагрузки q' , в 1,5 р. больше, чем от нагрузки q в элементе без усиления. Т.е. при равенстве в расчетном сечении значений нормальных напряжений этих балок, значения касательных напряжений в уровне нейтрального слоя древесины усиленная балка превосходит в 1,5 раза балку без усиления.

Проанализировав изменение несущей способности деревянного элемента при усилении углеродным волокном, можно сделать следующий вывод, что балка с переменным армированием получается равнопрочной по нормальным напряжениям балке с постоянным армированием при

явной экономии углеволокна и несущественным уменьшением несущей способности по скалывающим напряжениям.

При применении углеволокна в качестве элемента внешнего армирования в местах повреждений или на всю длину деревянной балки с целью восстановления ее несущей способности и дальнейшей эксплуатации с прежней нагрузкой дополнительных мер по усилению на действие скалывающих напряжений применять не нужно, т.к. в этом случае значения скалывающих напряжений уменьшатся на 5-10%.

Если же углеволокно применяется с целью повышения несущей способности деревянной балки и дальнейшей ее эксплуатации с большей нагрузкой, то в этом случае необходимо предпринять дополнительные меры по усилению конструкции в приопорной зоне в месте действия максимальных скалывающих напряжений.

В дальнейшем планируется определить – при каких значениях геометрических параметров усиливаемой конструкции (соотношений высоты сечения к пролету балки h/l , высоты сечения к ширине балки h/b и коэффициенте армирования μ), расчет на скалывающие напряжения является определяющим, т.к. в некоторых случаях, несмотря на существенное увеличение значений скалывающих напряжений значений расчетного сопротивления скалыванию они так и не достигают.

Литература

1. ГОСТ16483.3-84 Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. Технические условия. – Введ. 1985-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – VI, 7 с.
2. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции: утв. Минрегион России 28.12.2010: взамен СНиП II-25-80: дата введ. 20.05.2011. – М. [б.и.], 2011. – 88 с.
3. Щуко, В.Ю. Клееные армированные деревянные конструкции: учеб. пособие/ В.Ю. Щуко, С.И. Рощина – СПб.: ГИОРД, 2009г. – 128с.

УДК 624.953

О.Н. Рябова

Уторный узел с компенсатором стальных вертикальных цилиндрических резервуаров

Резервуарный парк России общим объемом около 22,5 млн м³ включает свыше 20 000 крупных резервуаров. Максимальный объем стальных вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР), находящихся в эксплуатации, составляет 100 тыс. м³ [9]. При таких объемах хранения резервуары представляют значительную опасность.

Но аварии ВЦР, независимо от их объёма, наносят материальный ущерб и приносят большой урон окружающей среде.

Их строительство должно сопровождаться улучшениями на всех стадиях жизненного цикла сооружения (проектирование, изготовление, монтаж, эксплуатация, обследование). Анализ статистики обнаружения дефектов резервуарных конструкций [2, 3, 4, 6, 11] позволил выявить наиболее распространенные из них: дефекты нижнего пояса стенки и днища резервуара. Таким образом, уторный узел днища представляет соединение конструктивных элементов, в которых дефекты были зафиксированы в наибольших процентных соотношениях. Поэтому изучение НДС именно этого узла является одной из приоритетных задач современного резервуаростроения. Кроме того, существующие нормы расчёта НДС корпуса резервуаров и, в частности, [1] не учитывают дополнительных напряжений, которые могут возникать в стенке от краевого момента, от очагов концентрации и «остаточных» напряжений в стенке резервуара, а также от зон локальной и общей потери устойчивости стенки РВС в случае её перенапряжения от неравномерной деформации грунтового основания. Многие научные школы в нашей стране занимаются разработкой данной проблемы [7, 8].

В диссертации Землянского А. А. [5] выполнен анализ НДС ВЦР большого объёма с помощью общей теории расчёта коротких цилиндрических оболочек. Показано, что уторный узел сопряжения стенки и днища практически у всех типовых резервуаров большого объёма работает не в упругой, а в пластической стадии деформирования металла. Была разработана новая конструкция уторного узла сопряжения стенки 1 и окрайки 2 (рис. 1) с использованием кольцевого компенсатора 5 и одноступенчатой гермозоны, характеризующаяся высокой технологичностью при изготовлении, низкой материалоемкостью и высокой эксплуатационной надёжностью [5].

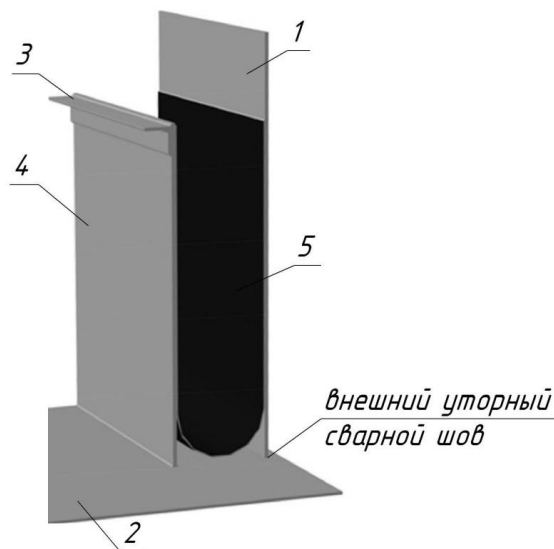


Рис.1. Конструктивная схема уторного узла с компенсатором по [5]

В предложенной конструкции уторного узла вертикальная стенка из-за одностороннего внешнего закрепления работает шарнирно. В случае локального разрушения внешнего сварного шва не происходит утечки хранимого нефтепродукта, так как имеется кольцевой компенсатор.

Землянским А.А. были проведены численные расчёты исследуемого элемента с использованием программы «Ли́ра-9», а также экспериментальные исследования на рабочем стенде, моделирующем плоскую задачу. Расчёты показали, что уровень НДС в компенсаторе не превышает допустимых значений.

Неосвещенным остается вопрос взаимодействия компенсатора с нижним поясом стенки, т.е. решение контактной задачи.

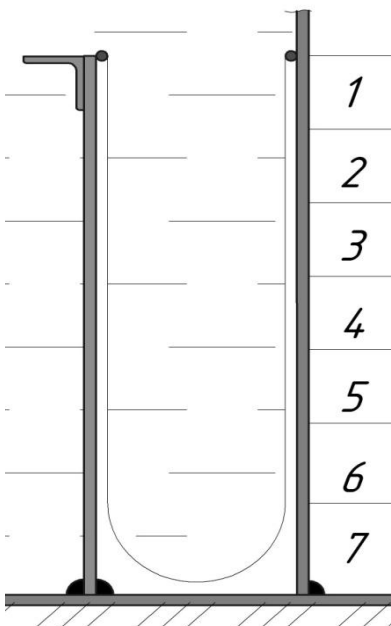
На сегодняшний день метод конечных элементов является универсальным средством анализа конструкций [10]. Программы, реализующие конечно-элементный анализ, также позволяют моделировать и контакт.

В программном комплексе MSC/Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности были созданы модели резервуара объемом 5000 м³ с новой и типовой конструкцией уторного узла. В модели с новой конструкцией узла контакт моделировался с помощью элементов типа *Slide Line*. На рис. 2 представлена деформированная схема уторного узла с компенсатором, находящегося под действием эксплуатационных нагрузок. Сравнительный анализ напряжений стенки в зоне уторного шва (табл. 1) показывает, что уменьшение напряжений произошло, в среднем, на 23 %. Таким образом, использование новой конструкции уторного узла позволяет значительно уменьшить напряжения в этой зоне.

Таблица 1

Сравнение напряжений (*Plate Top VonMises Stress*, МПа) на участках стенки в зоне уторного узла

	Типовая конструкция	Новая конструкция	%
1	162,2	130,3	20
2	168,6	129,7	23
3	175,2	131,4	25
4	174,1	131,0	25
5	150,7	114,9	24
6	83,2	63,2	24
7	116,8	88,6	24



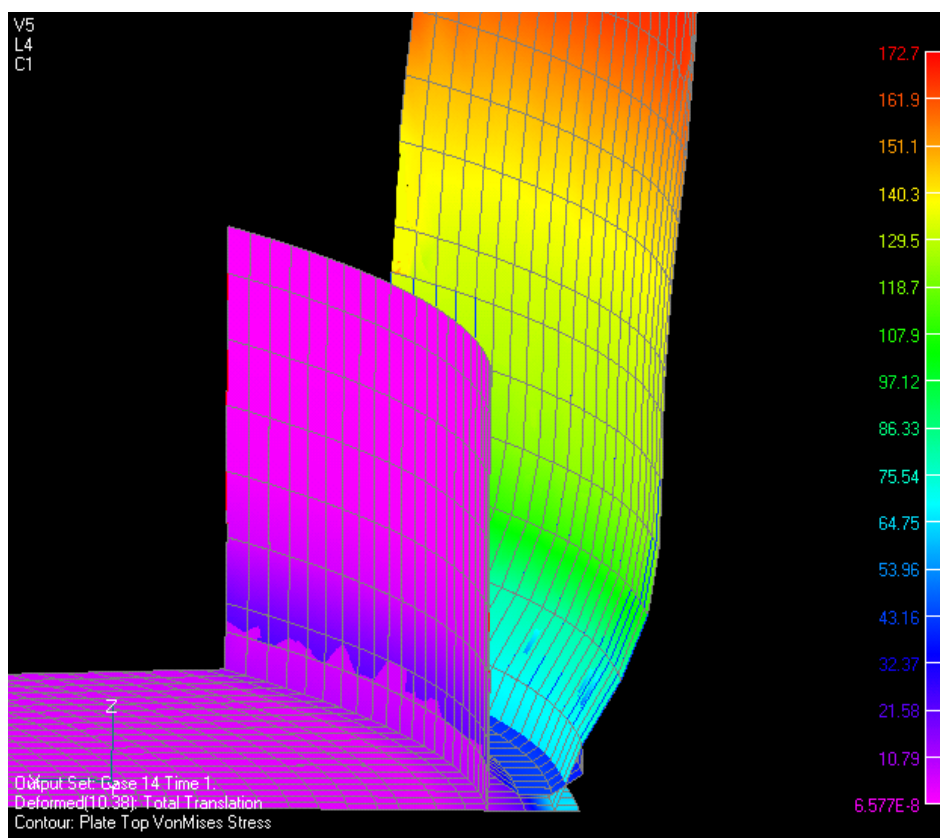


Рис. 2. Деформированная схема уторного узла с компенсатором

Литература

1. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов : [Электронный ресурс] утв. Госгортехнадзором России 09.06.03: взамен ПБ 03-381-00. – Режим доступа : Стройконсультант.
2. Потапов, А. Ю. Влияние деформационных характеристик грунтов основания на работу стенки и днища резервуара : автореф. дис. канд... техн. наук / А.Ю.Потапов. – Тюмень, – 2006. – 23 с.
3. Землянский, А. А. Опыт выявления дефектов и трещин в крупноразмерных резервуарах для хранения углеводородов/ А. А.Землянский // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7. – 41 с.
4. Рахматуллина, И. Р. Оценка прочности таврового соединения в уторном узле вертикальных стальных цилиндрических резервуаров/ И. Р. Рахматуллина, О. В. Четверткова // Проблемы геологии и освоения недр / Томс. политехн. ун-т. – Томск, 2010. – С. 266-268.
5. Землянский, А. А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров : автореф. дис. канд... техн. наук / А. А. Землянский. – Балаково, 2006.
6. Купреишвили, С. М. Механика разрушения вертикальных цилиндрических резервуаров / С. М. Купреишвили // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 5. – С. 40-42.

7. Холопов, И. С. Обеспечение несущей способности узла сопряжения стенки и днища взрывозащищённых вертикальных цилиндрических стальных резервуаров / И. С. Холопов, Э. Я. Еленицкий, О. А. Ковальчук, С. Э. Еленицкий // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 7. – С. 52-54.

8. Колесов, А. И. Напряженно-деформированное состояние зоны сопряжения стенки и днища вертикального сварного цилиндрического резервуара низкого давления. / А. И. Колесов, М. А. Агеева, И. А. Ямбаев // Приволжский научный журнал – 2010. - №3. – С. 50-56.

9. Сайгина, Ю. Н. Основные опасности резервуарных парков нефти и нефтепродуктов / Ю. Н. Сайгина // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России – 2012 : тез. докл. науч.-техн. конф. / Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина – М., 2012. – Ч. II. – С. 37.

10. Еленицкий, Э. Я. Проблемы оценки прочности напряженных участков резервуарных конструкций / Э. Я. Еленицкий, О. В. Дидковский // Нефть, газ и бизнес. – 2006. – № 5. – С. 58-63.

11. Ерофеев, В. В. К вопросу о повышении эксплуатационной надежности вертикальных цилиндрических резервуаров / В. В. Ерофеев, Р. Г. Шарафиев, С. В. Ерофеев // Вестник ЧГАА. – 2010. – Т. 58. – С. 118-126.

УДК 624.1014

А.Н. Селин

Подкрановые конструкции в системе каркаса промышленного здания

Подкрановые конструкции служат для передвижения кранов и воспринимают и передают на каркас здания нагрузки от подъемно-транспортного оборудования. Основным видом такого оборудования являются мостовые, опорные и подвесные краны. Кроме того, являясь элементами каркаса, подкрановые конструкции обеспечивают горизонтальную развязку колонн из плоскости рамы, передачу на вертикальные связи между колоннами продольных усилий от тормозных сил, ветровых нагрузок на торцы здания, сейсмических и других воздействий, и, в определенной степени, способствуют пространственной работе каркаса.

Состоят подкрановые конструкции из подкрановых балок (ферм), воспринимающих вертикальные или местные воздействия катков кранов; тормозных балок или ферм, воспринимающих горизонтальные воздействия кранов; вертикальных и горизонтальных связей, обеспечивающих необходимую жесткость и неизменяемость конструкций, а также крановых рельсов и упоров.

По расчетной схеме подкрановые конструкции подразделяются на разрезные, неразрезные и рамные. По конструктивной схеме подкрановые конструкции подразделяются на балки сплошного сечения, подкрановые фермы, подкраново-подстропильные фермы. Типы подкрановых конструкций представлены на рис. 1.

Каждая из конструкций имеет свои преимущества и условия, в которых работает максимально эффективно. Неразрезные балки экономичнее по расходу металла, но более трудоемки при монтаже из-за устройства монтажных стыков. Кроме того, в них возникают дополнительные напряжения при осадке опор.

При легких кранах (грузоподъемностью менее 30 т) и больших шагах колонн целесообразны подкрановые фермы. Их применение позволяет снизить расход металла по сравнению с разрезными сплошными балками. В подкрановых фермах движение крана может быть организовано как по верхнему поясу, так и по нижнему. Крутящий момент, в случае езды мостового крана по нижнему поясу фермы, возникающий от внецентренной передачи нагрузки, воспринимается дополнительными горизонтальными фермами. На подкрановую конструкцию могут опираться стропильные фермы, но в отличие от подкраново-подстропильных ферм, ездая балка не включается в состав нижнего пояса. Такое конструктивное решение крайне сложное и применяется в ограниченных случаях.

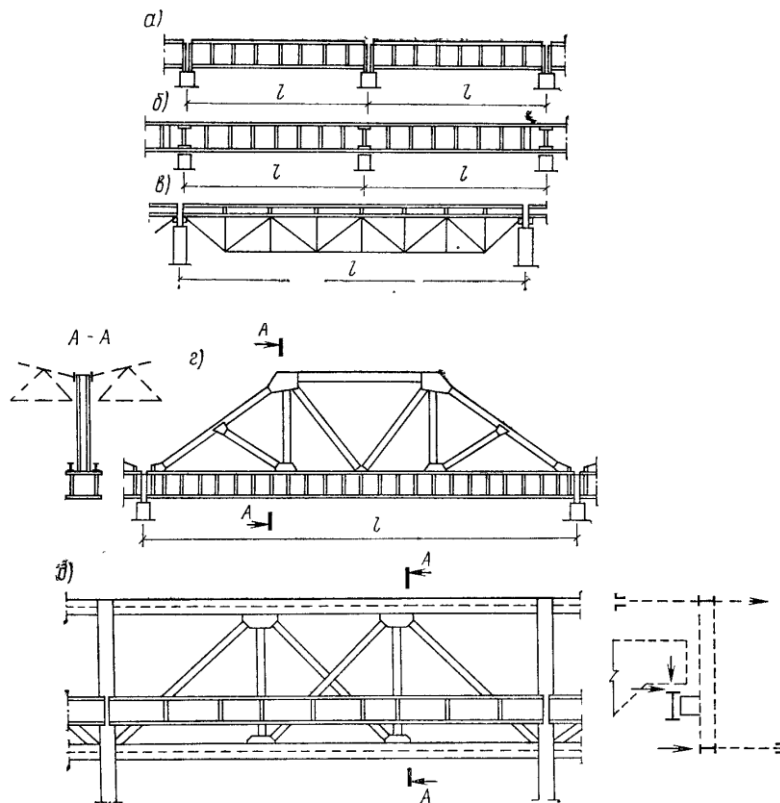


Рис. 1. Типы подкрановых конструкций: а) разрезная балка; б) неразрезная балка; в) ферма; г) подкраново-подстропильная ферма; д) ферма с ездой по низу.

При больших пролетах (24 м и более) и кранах высокой грузоподъемности применяются подкраново-подстропильные фермы (ППФ), объединяющие в себе подкрановую балку и подстропильную ферму. Эффективность таких конструкций возрастает с увеличением пролета. Нижний (ездовой) пояс выполняется в виде тонкостенной оболочки прямоугольного сечения, которая воспринимает местные вертикальные и горизонтальные воздействия крановой нагрузки между узлами фермы, крутящие моменты от внецентренного приложения нагрузок по отношению к центру кручения оболочки, а также усилия растяжения, как в нижнем поясе стержневой системы. На элементы верхнего пояса и решетки фермы опираются стропильные и другие конструкции. Таким образом, подкраново-подстропильная ферма – это комбинированная система, объединяющая подкрановые и подстропильные конструкции, в которой максимально использованы принципы совмещения функций и концентрации материала, позволяющие получить заметную экономию стали.

Уникальность конструкций типа ППФ заключается еще и в том, что они могут использоваться при очень больших пролетах. ППФ применяются в различных цехах заводов черной металлургии, а также в большепролетных зданиях с поперечным расположением мостовых кранов в уровне покрытия, например на авиастроительных, кораблестроительных заводах, где пролеты достигают ста метров и более. В таких условиях использование ППФ является, по-видимому, единственно верным решением.

Работа подкрановых конструкций в условиях эксплуатации весьма сложна и существенно отличается от работы обычных балочных конструкций. Это обусловлено спецификой нагрузки, характером ее приложения и отличием реальной от расчетной схем конструкции.

Сосредоточенная вертикальная крановая нагрузка, достигающая больших величин (600-800 кН), может быть приложена в любой точке по длине балки и приводит к появлению в стенке сложного напряженного состояния при высоком уровне напряжений.

Вследствие внецентренного приложения вертикальной нагрузки (при случайных смещениях рельса с оси подкрановой балки) и наличия поперечных горизонтальных сил, приложенных в уровне головки рельса, на верхний пояс балки действует дополнительный крутящий момент, вызывающий изгиб стенки. Вертикальные и боковые воздействия кранов носят динамический характер и часто сопровождаются рывками и ударами. Этому способствуют не прямолинейность кранового пути и перепады в стыках рельсов. Все это приводит к появлению в подкрановых конструкциях повреждений в виде усталостных трещин, расстройств соединений, ослаблений узлов и в конечном итоге нарушает их нормальную эксплуатацию.

Основными повреждениями подкрановых конструкций являются трещины в верхнем пояском шве и околошовной зоне, повреждения швов крепления тормозных конструкций к подкрановым балкам, повреждения элементов узлов крепления балок к колоннам. Преждевременному появлению повреждений способствуют дефекты изготовления и монтажа конструкций: низкое качество сварки, неточный монтаж, смещения рельса с оси подкрановой балки.

Приведенный краткий анализ позволяет сделать вывод о том, что действительная работа подкрановых конструкций и подкраново-подстропильных ферм в особенности достаточно сложна и не в полной мере изучена. Многовариантность действующих на ППФ нагрузок в сочетании с конструктивными особенностями соединений элементов решетки с ездовым поясом, с одной стороны, и обеспечение надежности работы таких конструкций в течение всего нормируемого срока эксплуатации, с другой стороны, требуют детального изучения работы элементов и узлов ППФ с разработкой обоснованных предложений по их совершенствованию.

Литература

1. Закономерность повреждений подкраново-подстропильных ферм на стадии эксплуатации. [Электронный ресурс]: Предотвращение аварий зданий и сооружений. – электрон. журн. – режим доступа : <http://ramag.ru/>
2. Лампси Б.Б. Оценка влияния особенностей конструкции и нагрузки на напряженное состояние и прочность ездовых поясов систем типа подкраново-подстропильных ферм: дис. ... канд. техн. наук / Б.Б. Лампси; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н.Новгород, 1983. – 222 с.
3. Металлические конструкции. Общий курс: учебник для вузов/ Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Г. С. Ведеников, [и др.]. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 506 с : ил.
4. Металлические конструкции. Общий курс: учебник для вузов/ Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатьева [и др.]. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1998. – 760 с : ил.
5. Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций/ ЦНИПСК им. Н.П. Мельникова: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 1976.

Исследование устойчивости сжатых прямоугольных пластин с отверстиями

Потеря устойчивости сжатых элементов тонкостенных металлических конструкций, а именно: отсеков сварных балок, судовых переборок, элементов обшивки корпуса и т.п., является опасным и распространенным видом предельных состояний, характерной особенностью которого является его внезапность.

Достаточно часто возникает ситуация, когда тонкостенные элементы конструкций оказываются ослабленными отверстиями, форма и размеры которых определяются исходя из конструктивных или технологических соображений, что может в значительной степени понизить величину критической нагрузки.

Исследования, посвященные расчетной оценке влияния формы и величины отверстия на величину критической нагрузки при различных способах приложения нагрузки и закрепления краев пластины, в настоящее время проводятся и на сегодняшний день представляются актуальными. Так, в работе [3] исследовалось влияние на устойчивость сжатых в своей плоскости пластин надрезов (трещин), отличающихся длиной и расположением, а в работе [2] аналогичное исследование было выполнено для пластин ослабленных вырезами при различных видах напряженного состояния.

В настоящей работе влияния формы и величины отверстия на величину критической нагрузки проводилось для простейшего случая стальной прямоугольной пластины (рис. 1), ослабленной круглым отверстием, и нагруженной на двух противоположных гранях распределенной сжимающей нагрузкой. Выбранная методика проведения исследования включала в себя проведение серий численных экспериментов по определению значений критической нагрузки при нескольких значениях, принятых к рассмотрению геометрических параметров, с последующим анализом характера и степени их влияния на результат.

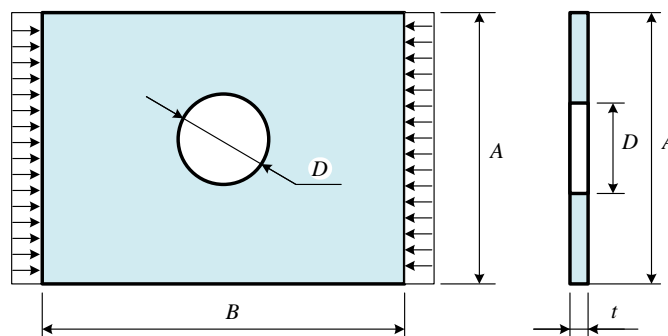


Рис. 1. Геометрические размеры модели

Принятые для проведения численных экспериментов базовые значения геометрических размеров пластины приведены в табл. 1. Ширина пластины (размер нагруженной кромки) во всех рассмотренных случаях принималась равной $A = 1000$ мм.

Таблица 1

Геометрические параметры пластины		
Значения геометрических параметров пластины		
Длина пластины, мм B	Диаметр отверстия, мм D	Толщина пластины, мм t
1000	0	6
1250	100	8
1500	200	10
	300	

Распределенная сжимающая сила задавалась по торцевым (коротким) сторонам пластины (рис. 1).

Задача решалась в упругой постановке.

В качестве материала пластины рассматривалась малоуглеродистая сталь со следующими физико-механическими характеристиками:

- модуль упругости – $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
- коэффициент Пуассона – $\nu = 0,28$.

Пластина закреплялась шарнирно (свободное опирание) по двум торцевым нагруженным граням (рис. 2). Продольное (два узла) и поперечное (один узел) закрепление угловых точек обеспечивало неподвижность пластины как твердого целого.

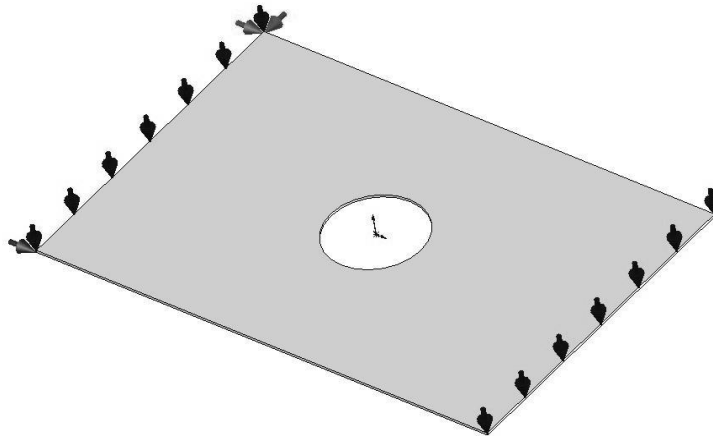


Рис. 2. Первый вариант закрепления пластины

Запланированная серия расчетов была выполнена методом конечного элемента при помощи программного комплекса COSMOSWorks, который представляет собой дополнение к известному пакету геометрического моделирования твердых тел SolidWorks.

Характерный вид сетки конечных элементов, полученной в результате работы алгоритма автоматического построения сетки для одной

из комбинаций принятых к рассмотрению геометрических параметров пластины, показан на рис. 3. Для большей достоверности получаемых результатов сетка конечных элементов сгущалась в области ожидаемой концентрации напряжений.

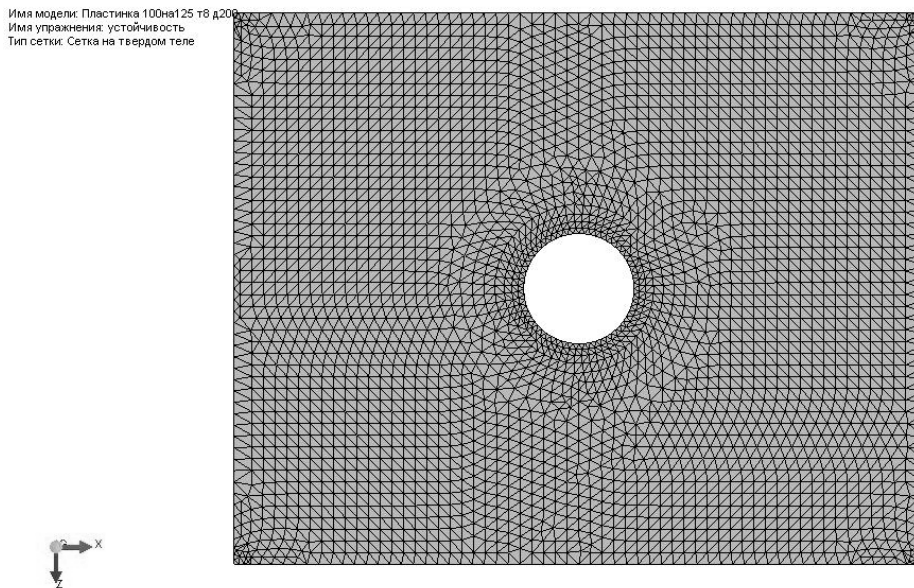


Рис. 3. Внешний вид сетки конечных элементов на примере пластины 1000 на 1250мм, толщиной 8мм, с отверстием диаметром 200мм

В качестве примера для конкретного набора геометрических параметров на рис. 4 приведена полученная в численном эксперименте характерная форма потери устойчивости пластины при свободном опирании ее границ.

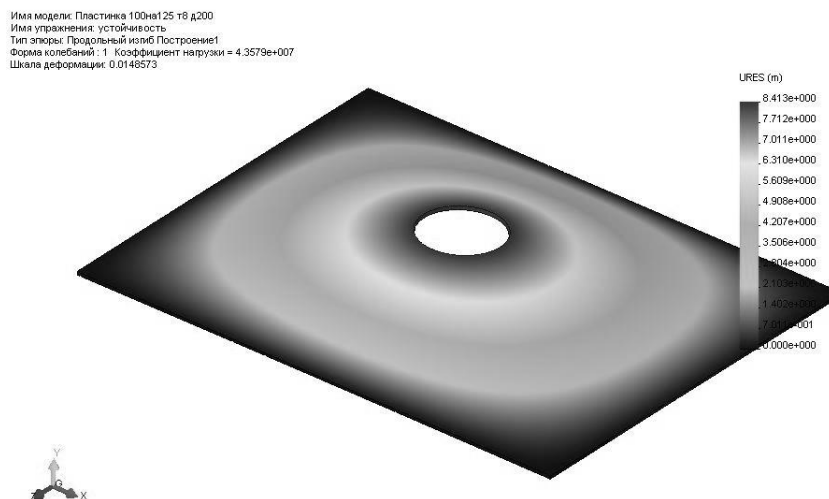


Рис. 4. Форма потери устойчивости пластины 1000 на 1250мм, толщиной 8мм, с отверстием диаметром 200мм

Результаты проведенных численных экспериментов, а именно критические значения распределенной по торцам нагрузки, приведены в табл. 2.

Значения критической нагрузки

Значения критической нагрузки q_{cr} , Н/м ²				
$\eta = B / A$	$\xi = D / A$	$t = 6$ мм	$t = 8$ мм	$t = 10$ мм
$A = 1000$ мм $B = 1000$ мм $\eta = 1$	$\xi = 0.0$	6,4456E+06	1,1463E+07	1,7882E+07
	$\xi = 0.1$	6,2659E+06	1,1118E+07	1,7360E+07
	$\xi = 0.2$	5,7604E+06	1,0222E+07	1,5963E+07
	$\xi = 0.3$	5,0742E+06	9,0196E+06	1,4083E+07
$\eta = B / A$	$\xi = D/A$	$t = 6$ мм	$t = 8$ мм	$t = 10$ мм
$A = 1000$ мм $B = 1250$ мм $\eta = 1.25$	$\xi = 0.0$	4,1009E+06	7,2866E+06	1,1380E+07
	$\xi = 0.1$	4,0088E+06	7,1122E+06	1,1125E+07
	$\xi = 0.2$	3,7383E+06	6,6417E+06	1,0372E+07
	$\xi = 0.3$	3,3609E+06	5,9705E+06	9,3129E+06
$\eta = B / A$	$\xi = D/A$	$t = 6$ мм	$t = 8$ мм	$t = 10$ мм
$A = 1000$ мм $B = 1500$ мм $\eta = 1.5$	$\xi = 0.0$	2,8313E+06	5,0330E+06	7,8542E+06
	$\xi = 0.1$	2,7766E+06	4,9366E+06	7,7060E+06
	$\xi = 0.2$	2,6213E+06	4,6597E+06	7,2760E+06
	$\xi = 0.3$	2,3914E+06	4,2426E+06	6,6301E+06

Для удобства анализа полученных результатов введены параметры ξ и η :

$$\eta = B / A, \quad \xi = D / A, \quad (1)$$

которые определяют форму рассматриваемой пластины.

Как указывалось выше (табл. 1), численные решения были получены также и для пластин, не содержащих отверстий. Наличие этих результатов позволило убедиться в высокой степени адекватности конечноэлементных моделей путем сравнения их с аналитическим решением. Аналитическое решение задач потери устойчивости прямоугольных сжимаемых пластин приводится, в частности, в работе [1].

Далее полученные значения критических нагрузок были представлены в приведенной форме:

$$q_{cr} = \chi \cdot q_{cr}^* \quad (2)$$

где χ – коэффициент приведения критической нагрузки, равный отношению критической нагрузки, полученной для пластины с отверстием, к критической нагрузке q_{cr}^* , полученной для пластины, не содержащей отверстия ($\xi = 0$).

Результаты такого приведения представлены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3 показал, что влияние толщины пластины на результат очень мало и находится в рамках погрешностей, связанных с особенностями расчетных моделей. Влияние параметров ξ и η , тем не менее, является существенным.

Для получения расчетных формул прикладного характера была выполнена интерполяция данных с помощью полинома третьей степени, зависящего от геометрического параметра ξ :

$$\chi = 1 + a\xi + b\xi^2 + c\xi^3, \quad (3)$$

где $\xi = D/A$ – отношение диаметра отверстия к поперечному размеру пластины.

Значения коэффициентов приведения критической силы

Коэффициент приведения критической силы χ				
$\eta = B/A$	$\xi = D/A$	$t = 6$ мм	$t = 8$ мм	$t = 10$ мм
$A = 1000$ мм $B = 1000$ мм $\eta = 1$	$\xi = 0.1$	0.97212	0.96990	0.97081
	$\xi = 0.2$	0.91932	0.91941	0.91953
	$\xi = 0.3$	0.88087	0.88237	0.88223
$\eta = B/A$ $A = 1000$ мм $B = 1250$ мм $\eta = 1.25$	$\xi = 0.1$	0.97754	0.97607	0.97759
	$\xi = 0.2$	0.93252	0.93385	0.93231
	$\xi = 0.3$	0.89905	0.89894	0.89789
$\eta = B/A$ $A = 1000$ мм $B = 1500$ мм $\eta = 1.5$	$\xi = 0.1$	0.98068	0.98085	0.98113
	$\xi = 0.2$	0.94407	0.94391	0.94420
	$\xi = 0.3$	0.91230	0.91049	0.91123

Для определения коэффициентов интерполяционного полинома была предложена следующая серия квадратичных интерполяций по другому геометрическому параметру η :

$$\begin{cases} a = -0.098 - 0.052 \cdot \eta + 0.064 \cdot \eta^2 \\ b = -7.622 + 7.174 \cdot \eta - 2.264 \cdot \eta^2 \\ c = 17.832 - 17.536 \cdot \eta + 5.344 \cdot \eta^2 \end{cases} \quad (4)$$

где $\eta = B/A$ – соотношение сторон пластины.

Представленные формулы позволяют в случае необходимости оценивать устойчивость сжатой пластины с отверстием, делая это быстро и с хорошей точностью.

Дальнейшие исследования в этом направлении планируется продолжать, расширяя набор вариантов закрепления (и подкрепления) краев пластины, а также включая в рассмотрение более сложные виды напряженно-деформированного состояния пластин.

Литература

1. Никифоров, С. Н. Теория упругости и пластичности: учебник/ С.Н. Никифоров. – М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1955. – 282 с.
2. Лебедев, А. В. Устойчивость тонких пластин и оболочек, ослабленных отверстиями: автореф. дисс. ... канд. техн. наук/ А.В.Лебедев – СПб., 2010. – 26 с.
3. Жуков, А. В. Моделирование задач устойчивости тонких пластин, содержащих дефекты типа трещин: автореф. дисс. ... канд. техн. наук/ А.В.Жуков. – Н. Новгород: НГТУ, 2011. – 25 с.

Проблемы проектирования высотных многофункциональных энергоэффективных зданий для северной части субарктической зоны Мурманской области

Территории субарктического и арктического поясов России – это экономически и стратегически важные регионы России [1]. Поэтому необходимость их освоения и развития постоянно возрастает в силу ряда причин:

- на северных побережьях и морских шельфах в последние десятилетия разведаны богатейшие месторождения полезных ископаемых – нефти и газа;

- в условиях глобального потепления климата наметилась тенденция таяния полярных льдов, что в значительной степени облегчает проход судов из Европы в Азию и к западному побережью Канады по Северному Морскому Пути по территориальным водам России в летний период года;

- уникальность и своеобразие северной природы – животный и растительный мир, чистота рек и озёр, незаходящее летнее солнце и полярное сияние зимой привлекают к себе внимание учёных, исследователей и туристов;

- мониторинг и прогнозирование развития погодных явлений в бассейнах евразийских северных морей необходимы практически для всех отраслей экономики и особенно для сельского хозяйства, морских промыслов, для геологов, моряков и пограничников, а также для жителей Севера, поскольку Северный Ледовитый океан оказывает непосредственное влияние на погоду практически всей территории России и других северных государств.

Таким образом, субарктические и арктические пространства России в современном мире становятся объектом все более активного изучения, исследования и освоения. Разведка, добыча, первичная переработка и транспортировка полезных ископаемых, обеспечение проводки по Северному морскому пути караванов судов, охрана и изучение природы, климата северных территорий, охрана тысяч километров северных сухопутных границ России требуют привлечения больших ресурсов, в том числе и большого количества специалистов. Людям необходимо предоставить нормальное жильё, создать условия для результативного труда и полноценного отдыха. Всё это нужно сделать в малообжитых районах, в условиях сурового климата и на огромных территориях, практически при полном отсутствии какой бы то ни было инфраструктуры. Для решения этих задач есть несколько путей:

- 1) восстанавливать и обустраивать оставленные людьми и полуразрушенные старые базы и модернизировать, развивать немногочисленные существующие северные поселения;

2) строить новые базы и поселения там, где это нужно сейчас и будет нужно в будущем;

3) на основе проведения технико-экономического анализа и вариантного сравнения комплексно, в определённых масштабах использовать и тот, и другой путь с учётом их целесообразности.

Путь восстановления не всегда будет отвечать потребностям сегодняшнего и завтрашнего дня, так как не всегда старые места поселений совпадают с вновь открывшимися местами сосредоточения интересов государства, приложения сил и средств хозяйствующих субъектов. Тем не менее, он важен с социальной точки зрения, так как улучшит условия проживания и труда местного населения.

Второй путь наиболее затратный, хотя и более выгодный для решения прагматических задач настоящего и будущего времени.

Скорее всего наиболее целесообразен третий путь, сочетающий преимущества первых двух решений. Но для этого необходимо решить вопрос о том, как и чем застраивать принимаемые к восстановлению, модернизации и новому строительству поселения. Это могут быть традиционные для центральных областей России здания и сооружения, приспособленные к суровым условиям северного климата. Таким образом и происходила застройка русского севера поселениями в прошлом столетии. Временные поселения чаще всего образовывались с помощью утеплённых вагончиков и сборно-разборных контейнеров. Коренное население северных территорий традиционно придерживалось кочевого образа жизни и поэтому жило в перевозимых сборно-разборных конусообразных постройках – чумах, ярангах, иглу, рассчитанных на проживание одной семьи. Ни те, ни другие жилища не удовлетворяют требованиям современности.

Для Севера сейчас нужны многоэтажные, компактные в плане, многофункциональные энергоэффективные здания с минимальными потерями тепла через наружные ограждающие конструкции, с минимальной протяжённостью коммуникаций, особенно наружных, особенно теплотрасс. Энергоэффективность зданий – тема, в последние годы актуальная в мире. Энергоэффективными называются такие здания, при проектировании которых предусмотрен комплекс архитектурных и инженерных мероприятий, обеспечивающих существенное снижение затрат энергии на теплоснабжение этих зданий по сравнению с обычными (типовыми) зданиями при одновременном повышении комфортности микроклимата в помещениях.

С учётом вышесказанного наиболее экономичным для этой местности может быть высотное энергоэффективное здание. Методология проектирования энергоэффективного высотного здания должна основываться на системном анализе здания как единой энергетической системы. Проанализировав имеющиеся материалы, можно выделить основные аспекты, на которые нужно обращать внимание при

проектировании, строительстве и эксплуатации энергоэффективных высотных зданий:

- форма здания;
- нетрадиционные возобновляемые источники энергии (энергия солнца, воды, ветра, земли);
- современное инженерное оборудование;
- современные ограждающие конструкции.

Для таких суровых мест, как северо-западный участок побережья Баренцева моря в Мурманской области необходимы здания, в которых было бы комфортно и удобно жить, работать, служить и отдыхать многим категориям специалистов, членам их семей, туристам, которые были бы максимально приближены к местам приложения труда и интересов проживающих в них людей. Нужны поселения, которые в течение долгого периода времени, месяцами могли бы обходиться без грузовой связи с центральными поселениями, с областными и краевыми центрами, без энергетической зависимости от них. Таким требованиям отвечают компактные в плане, сблокированные объекты, имеющие минимальное отношение суммарных площадей наружных ограждающих конструкций к суммарным общим и полезным площадям объекта. При этом большинство помещений объекта должно иметь естественное освещение и внутреннюю связь между собой. В наибольшей мере всем этим условиям отвечает одно высокое здание, имеющее в плане треугольное, квадратное, многогранное или округлое очертание, или небольшая группа сблокированных высоких зданий, соединенных между собой отапливаемыми или частично отапливаемыми переходами, имеющая общую инфраструктуру, в том числе, энергетическую.

Такой объект можно назвать зданием-поселением, если в нём удастся сосредоточить все основные функции обычного поселения: проживание, трудовые процессы, отдых и управление. Часть рабочих операций и функций, по необходимости, может и должна быть вынесена за пределы здания.

Это здание-поселение, которое соответствует указанным выше условиям, должно быть прочным, устойчивым к различным неблагоприятным воздействиям, долговечным, взрыво- и пожаробезопасным, индустриальным и быстровозводимым, так как предназначено для строительства в отдалённом, труднодоступном и суровом районе страны. В значительной мере этим требованиям отвечает каркасно-панельное здание комплектной поставки с использованием легких металлических конструкций и современных утепляющих материалов.

Строительство такого здания в данном случае связано со следующими особенностями и неблагоприятными факторами для строительства:

- удалённость места от промышленно развитых районов, что затрудняет транспортировку стройматериалов, оборудования, рабочей силы;
- неблагоприятные природно-климатические условия: суровый климат, большое количество рек и озёр, высокая заболоченность;
- сложные инженерно-геологические условия территории: наличие вечномёрзлых грунтов, термодинамически неустойчивых к природным и техногенным воздействиям, и местами обладающих такими свойствами как просадочность, пучинистость, ползучесть;
- уязвимость природной среды, которая ограничивает объём техногенной нагрузки и требует специальных мероприятий по инженерной защите как сооружений, так и территории освоения;
- верхний покровный (деятельный) слой грунта, расположенный над вечномёрзлыми пластами, подвергается сезонному замерзанию и оттаиванию. В зависимости от глубины залегания вечномёрзлого грунта сезонная мерзлота может сливаться с ним или же отделяться от него слоем талого грунта.

Поэтому подходы к проведению строительных работ в условиях вечной мерзлоты должны быть основаны на выполнении принципов экологической безопасности, технической надёжности и экономической целесообразности.

Вариант строительства на северной территории отдельно стоящего высотного здания-поселения, включающего в себя комплекс инфраструктур, позволит:

- сосредоточить весь объём разнофункциональных помещений, рассредоточенных по моно- или бифункциональным малоэтажным северным зданиям, в одном высотном здании;
- существенно сократить суммарную площадь наружных ограждающих конструкций при том же полезном объёме и, за счёт этого, – увеличить отношение полезного объёма высотного здания к площади наружных ограждающих конструкций;
- уменьшить затраты на утепление полов первых этажей в связи с небольшой их площадью и наличием в высотных зданиях подвальных складских помещений, не нуждающихся в поддержании комфортной для человека температуры;
- упростить подвод коммуникаций и их ремонт, а следовательно, и их протяжённость;
- сократить транспортные пути и пешие переходы;

Все перечисленные достоинства позволят существенно повысить надёжность и экономичность застройки в условиях северного строительства.

Проектирование высокого здания для северных условий независимо от его целевого назначения требует комплексного учёта различных

аспектов проектирования, изготовления строительных конструкций, производства работ, соблюдения особых технологий, тщательного изучения грунта и контроля за состоянием здания. Особенно это важно при производстве работ в условиях вечной мерзлоты. При разработке архитектурно-планировочного и конструктивного решений многоэтажного здания и систем его инженерного обеспечения необходим комплексный учёт функциональных, эстетических, технических и экономических требований. Необходимо особое внимание уделять соблюдению требований по пожарной безопасности, которые должны быть учтены в объёмно-планировочном решении здания, при выборе материалов несущих и ограждающих конструкций и способов обеспечения их требуемой огнестойкости, при разработке инженерных и противопожарных систем и правил эксплуатации здания. Проектирование здания должно осуществляться единой системой, в которой должны быть учтены требования, предъявляемые и к жилым, и к общественным, и к производственным зданиям.

Литература

1. «Международный форум «Арктика: настоящее и будущее», в «Север – наш!», Национальное интернет-издание о северных и арктических территориях России. Выпуск № 608, 07 декабря 2012г. [Электронный ресурс].
2. Бродач М.М. Время новых зданий и возможностей / М.М. Бродач //АВОК – 2005.– № 6;
3. Интернет-ресурс: <http://www.arhitecture.ru>
4. Интернет-ресурс: <http://chudomir.com>

УДК 62-1/-9

В.В. Фатеев

Экспериментальная установка для испытаний горизонтальными нагрузками моделей свайных фундаментов с однорядным расположением призматических свай

Исследованиям работы одиночных свай и компактных групп (кустов) свай на действие горизонтальных нагрузок посвящены работы многих отечественных и зарубежных специалистов, разработавших достаточно надёжные, проверенные на практике методы расчёта. В значительно меньшей степени изучена работа фундаментов с рядным расположением свай, используемых в качестве подпорных конструкций, на которые действует оползневое давление грунта, направленное вдоль плоскости расположения свай.

Для исследования работы горизонтально нагруженных фундаментов с линейным расположением призматических свай нами разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить испытания моделей однорядных свайных фундаментов при совместном действии горизонтальных и вертикальных нагрузок (рис.1).

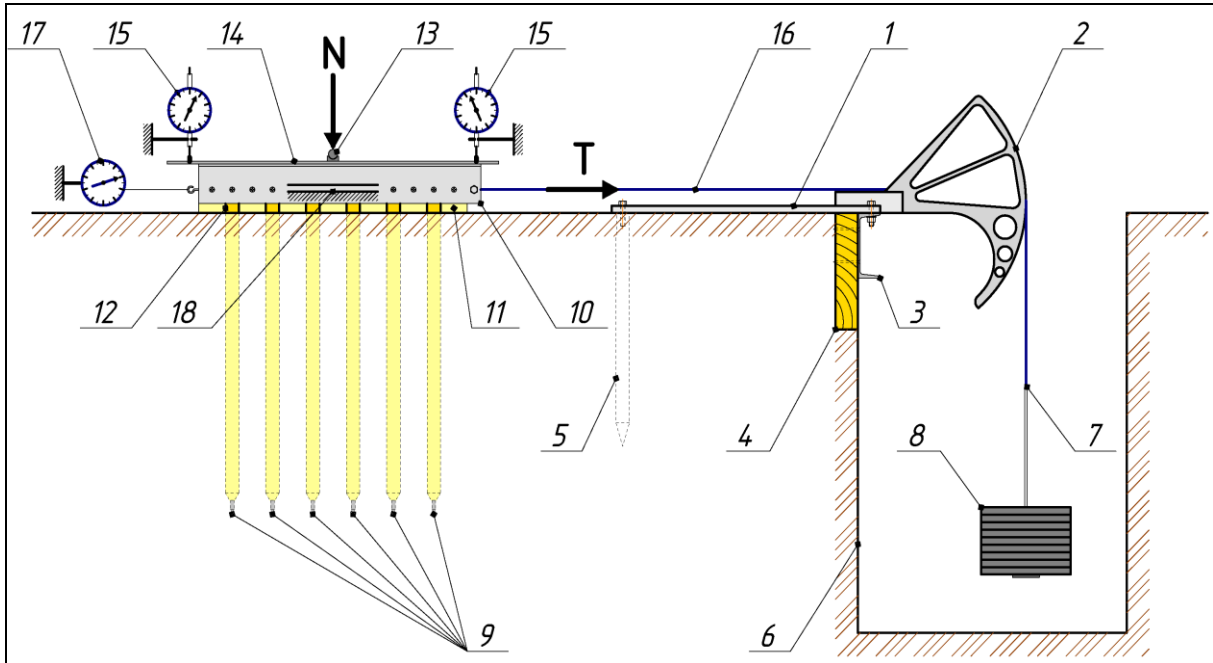


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Установка готовится к работе следующим образом. Нижняя плоскость опорной плиты 1 силового устройства устанавливается на поверхности грунта испытательной площадки. Горизонтальное положение плиты выверяется с помощью уровня. Неподвижность плиты в процессе эксперимента обеспечивается креплением её болтами к швеллеру 3 и распределительному брусу 4, а также креплением стальными штырями-анкерами 5, забитыми в грунтовой массив.

Прямо́к 6 глубиной 1,1 м, шириной 0,9 м предназначен для обеспечения нормальной работы силовой установки, с помощью которой на сваи передаются горизонтальные нагрузки. Для этого на подвеску 7 рычага 2 с соотношением плеч 1:10, укладываются плоские тарированные грузы 8, диаметром 200 мм.

Подготовка моделей свайных фундаментов к испытаниям выполняется в следующей последовательности. Погружение забивных призматических свай 9, изготовленных из древесины сосны (рис.2) длиной 600 мм и поперечным сечением 30x30 мм (рис.3) производится на заданную глубину при помощи ручного молота специально подобранной массы (рис. 4). При этом определяется количество ударов необходимых для забивки каждой сваи, и также измеряется отказ (осадка) сваи от последнего удара. Это даёт возможность определить ориентировочное значение несущей способности каждой сваи, использованной в эксперименте.

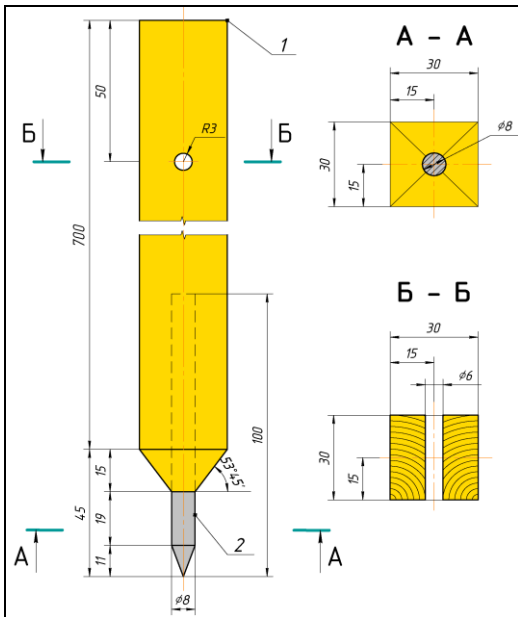


Рис.2. Конструкция модели сваи. В острие сваи, имеющей форму четырёхгранной усечённой пирамиды, вставлен наконечник, представляющий собой цилиндрический стальной стержень-лидер диаметром 8 мм, длиной 100 мм с глубиной заделки в ствол модели 70 мм

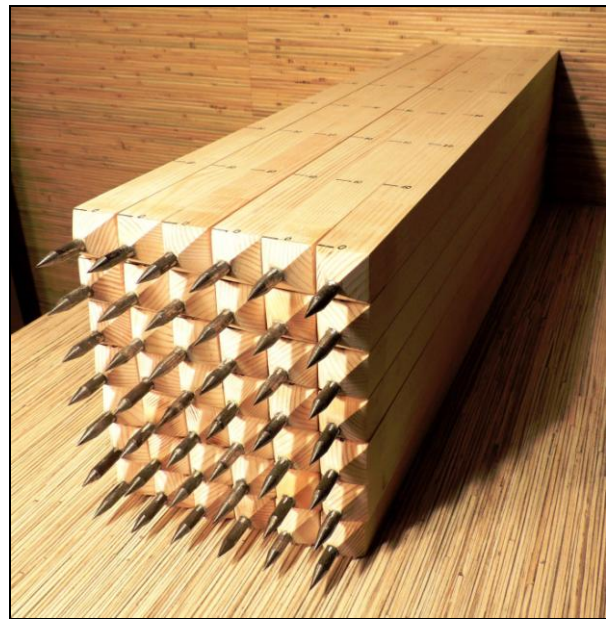


Рис.3. Модели свай, подготовленные для испытаний, изготовленные из цельного массива древесины сосны, не имеющего как естественных (сучки) так и приобретённых (усушечные трещины) пороков



Рис.4. Ручной молот и кондуктор в рабочем положении. Молот поднимается за боковые ручки до фиксированной высоты и сбрасывается. При этом наносится удар по наголовнику, предохраняющему сваю от разрушения

Для того чтобы предотвратить расщепление и разрушение головы свай в процессе их забивки в грунт, был использован специально разработанный инвентарный, легко собирающийся и разбирающийся наголовник (рис.5), состоящий из четырех фигурных пластин. Для того чтобы обеспечить нанесение удара строго вдоль продольной оси свай, использовалась легкосъёмная стальная плита, фиксирующаяся от горизонтальных перемещений в оголовке, и крепящаяся в плите вертикальная направляющая штанга.

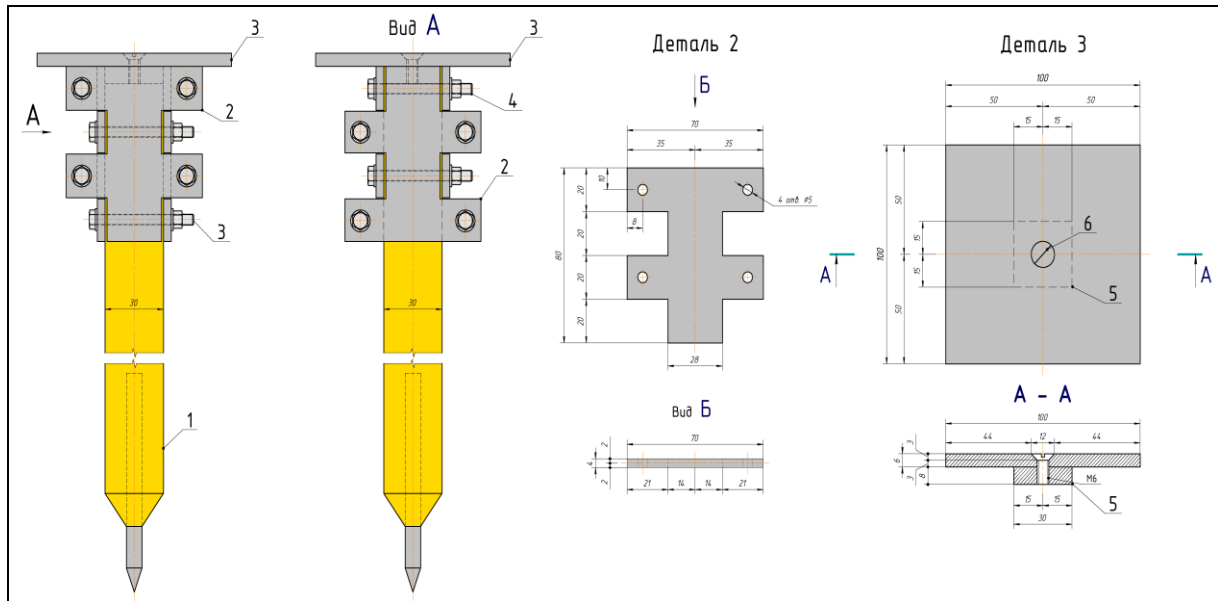


Рис.5. Конструкция наголовника: 1 – модель свай; 2 – стальные пластины наголовника с прямоугольными вырезами; 3 – горизонтальная пластина, по которой наносится удар падающим грузом; 4 – болты М5х50 мм с шестигранной головкой в комплекте с двумя шайбами с увеличенным полем и гайкой М5; 5 – квадратная шайба-фиксатор 8х30 мм; 6 – винт с потайной головкой 6х12 мм.

Штанга была изготовлена из прутковой стали диаметром 12 мм длиной 1100 мм, отполированная поверхность которой, смазанная машинным маслом, позволила исключить трение молота при нанесении удара. Молот представляет собой цилиндрическую стальную болванку с центральным продольным отверстием, обеспечивающим строго вертикальное перемещение молота при его сбрасывании вдоль направляющей штанги.

Энергия ударов, наносимых по сваям, регулировалась изменением массы молота и высоты его сбрасывания.

Расположение ряда моделей свай строго в одной вертикальной плоскости и на одинаковом расстоянии друг от друга обеспечивалось: 1) использованием специально разработанного и изготовленного кондуктора; 2) устройством в грунтовой массе до погружения свай вертикальных скважин-лидеров диаметром 10 мм с помощью вдавливаемого в грунт стального стержня; 3) наличием в острие свай стержней-наконечников, для которых лидерные скважины служат направляющей.

Кондуктор представляет собой конструкцию в виде прямоугольной в плане плоской стальной плиты, имеющей: 1) в центре квадратное отверстие с приваренной направляющей, выполненной из отрезка стальной трубы прямоугольного сечения размером 40x40x2 мм, длиной 100 мм; 2) квадратные вырезы в середине каждой из продольных сторон, расположенные на одной оси с направляющей; 3) отверстия диаметром 10,5 мм в углах плиты, предназначенные для её фиксации от горизонтальных перемещений с помощью вертикальных стальных стержней-шпилек диаметром 10 мм, длиной 500 мм, плотно прижимающих плиту к поверхности грунта.



Рис.6. Вертикальный разрез массива грунта после забивки сваи. При погружении лидирующий стержень-наконечник, расположенный в острие сваи движется вдоль направляющей лидерной скважины

Модель ростверка (рис.1) выполнена из двух неравнополочных уголков 10, с монтирующейся на них сверху опорной стальной плитой 14. Жёсткое сопряжение голов свай между собой и с ростверком обеспечивается с помощью деревянных призматических элементов 11 с поперечным сечением 30x60 мм, вставляемых между сваями, и тонких стальных пластинок 12, предназначенных для того, чтобы выбрать небольшие вертикальные зазоры между сваями и призматическими элементами 11.

Для создания вертикальной нагрузки использовались плоские тарированные грузы массой 3 кг, укладывавшиеся строго по центральной оси фундамента на горизонтальную поверхность ростверка 14.

Вертикальные перемещения фундамента измерялись с точностью до 0,01 мм при помощи двух индикаторов часового типа 15, смонтированных на противоположных концах ростверка.



Рис.7. Подготовленная к испытаниям модель свайного фундамента из 6-ти, расположенных в 1 ряд, свай

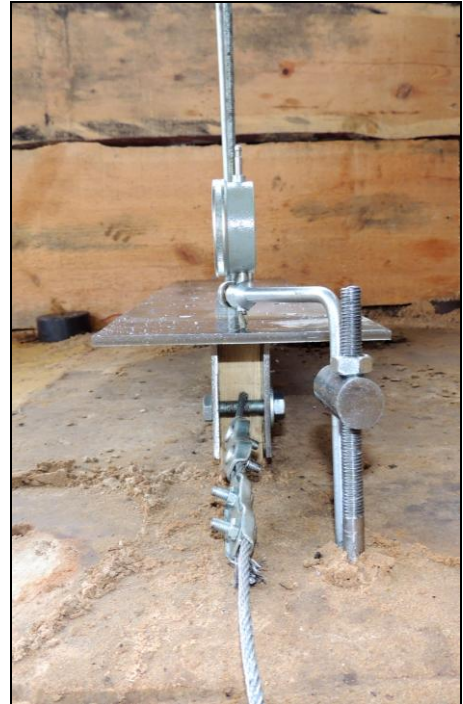


Рис.8. Фундамент в плоскости действия горизонтальной нагрузки

С помощью троса 16 силового устройства, в конструкции которого использовались элементы стандартного срезного прибора ГП-30, прикладывалась горизонтальная нагрузка. Горизонтальные перемещения фундамента измерялись в уровне приложения нагрузки прогибомером 17 с точностью 0,01 мм.

Скользящие опоры в виде плоских шарикоподшипников 18, расположенные по боковым сторонам ростверка, предотвращали боковые смещения фундамента из вертикальной плоскости во время проведения эксперимента.

Методика погружения моделей свай в полной мере моделирует технологию строительства эффективных свайных конструкций, используемых в качестве подпорных сооружений и в качестве фундаментов для зданий, возводимых на склоновых территориях.

Результаты выполненных исследований доказали эффективность и надёжность экспериментальной установки.

Большепролетные светопрозрачные конструкции для стадионов России

В настоящее время почти любые, даже самые смелые архитектурные идеи могут быть реализованы. И основными факторами, сдерживающими воплощение в жизнь всех значимых проектов современных архитекторов, чаще являются уже не отсутствие технических возможностей для строительства большого и сложного объекта, а польза будущего сооружения (его востребованность и рентабельность), время и цена реализации.

В 2012 году в России были разработаны достаточно простые и надёжные, лёгкие и недорогие большепролётные светопрозрачные покрытия. Их применение для перекрытия спортивных стадионов приведёт к тому, что наш футбол наконец-то избавится от осенне-весенней слякоти на полях и футболисты получат возможность показывать зрелищную и красивую игру на протяжении всего сезона. Стоимость таких покрытий составит не более 3-4% от сметной стоимости всего стадиона. А закрытые светопрозрачным покрытием спортивные арены дадут возможность заниматься на стадионе спортом и играть в футбол круглый год в самых комфортных условиях.

Раздвижные светопрозрачные покрытия для всех крупных стадионов в России можно возвести за несколько лет. При этом светопрозрачные покрытия можно возвести и на уже существующих стадионах, после некоторой реконструкции опорных конструкций. Цена раздвижного светопрозрачного покрытия относительно невелика, а результаты в развитии футбола и лёгкой атлетики смогут быть удивительно значимыми. А главное, и игрокам будет приятно играть, и болельщикам комфортно наблюдать за игрой команд.

Технология перекрытия больших и сверхбольших пролётов с помощью многопоясных тросовых систем позволяет строить самые разнообразные по объёму, форме и назначению здания и сооружения, в том числе: невиданные по размерам и объёму ангары, производственные цеха, атриумные пространства; крытые легкоатлетические и футбольные стадионы; жилые кварталы, накрытые светопрозрачной оболочкой; стеклянные пирамиды высотой до 500 м, в которых можно размещать многофункциональные комплексы объектов, большепролётные висячие мосты новой конструкции и др.

Многопоясность тросовых систем, обеспечивает им двояковыпуклость на любых величинах перекрываемых пролётов и даёт возможность, при всех суммарных расчётных нагрузках на систему, исключить любой возможный положительный прогиб покрытия. Кроме

этого, все нагрузки (в том числе точечные), действующие на тросовое покрытие, рационально и надёжно перераспределяются пространственной многопоясной тросовой системой и воспринимаются если не всем количеством несущих тросов, то значительной их частью.

Многопоясные тросовые системы состоят из высокопрочных предварительно напряженных тросов, выполненных из стальных проволок и/или углеродных волокон, и расположенную поверх них жесткую рамную конструкцию, несущую светопрозрачные элементы. Такая конструкция покрытия не только придаёт тросовым системам дополнительную жесткость, но и обеспечивает надёжность и целостность светопрозрачной оболочки в случаях аварийного выключения из работы отдельных тросов в системах покрытия.

Значительная несущая способность многопоясных тросовых систем, а также обеспеченная их устойчивость и жёсткость, позволяют, в качестве светопрозрачных элементов для покрытия защитного сооружения, использовать любые на выбор (без ограничений) светопрозрачные материалы, а также размещать на тросовом покрытии всё необходимое оборудование и системы для обеспечения его качественной эксплуатации. При этом теплотехнические, оптические, прочностные и другие свойства применяемых светопрозрачных материалов должны соответствовать тем климатическим и погодным условиям, в которых будет эксплуатироваться данное сооружение.

В направлении развития большепролётных светопрозрачных защитных сооружений (БСЗС), в которых много естественного света и комфорта, появляются новые идеи и создаются разнообразные уникальные проекты (например, «Купол над Хьюстоном»), а некоторые из этих удивительных проектов уже реализуются.



Рис. 1. Конструкция «Купола над Хьюстоном»

Конструкция представляет собой металлический каркас из шестиугольных секций, которые чередуются с пятиугольниками. «Застекление» производится пленкой «Foiltex» – это легкий пластик (тетрафторэтилен), состоящий из трех слоев. Он пропускает 98% лучей

солнечного спектра и выдерживает огромные нагрузки. Вес его составляет в сто раз меньше веса подобной стеклянной панели. В случае падения кусок тетрафторэтилена будет планировать как опавший лист с дерева.

Высота купола над Хьюстоном должна составить около 500 м, диаметр – 1600 м, общая площадь – 6,5 кв. км. Вместо кранов планируют использовать специальный дирижабль, который может перевозить грузы весом до 2 тонн. Город будет окружен бетонным кольцом, которое будет служить фундаментом для каркаса.

Такое же покрытие имеет комплекс для водных видов спорта «National Aquatic Center» в Пекине.



Рис. 2. «National Aquatic Center» в г. Пекин

В городе Астана построили 100-метровый (без учёта высоты шпиля) светопрозрачный шатёр, в котором разместили самый большой и презентабельный в Казахстане торгово-развлекательный центр.



Рис. 3. Торгово-развлекательный комплекс «Хан-Шатыр» в г. Астана

Но ещё более удивительный и грандиозный парк развлечений «Tropical Islands» создан в Германии. Этот немецкий центр водных развлечений имеет внутренний объём около 5,5 млн. куб метров и, вероятно, сейчас является самой большой по этому показателю постройкой на Земле.



Рис. 4. Центр водных развлечений «Tropical Islands» в Германии

В основу идеи многопоясных тросовых систем заложены давно известные принципы вантовых покрытий, которые уже более полувека широко применяются в мире для строительства большепролётных сооружений. Так, например, ещё в 1967 году в Ленинграде по похожей технологии был построен и активно эксплуатируется до сего дня дворец спорта «Юбилейный», а в Белоруссии в 2009 г. введён в эксплуатацию современный спортивный комплекс «Минск-Арена».

Конструктивная схема и технология постройки БСЗС практически такие же, как и у перечисленных спортивных сооружений. Разница в конструкции состоит, в основном, в следующем:

1) центральное металлическое кольцо вантового покрытия, к которому крепятся предварительно напряжённые высокопрочные стальные тросы, находится не в подвешенном состоянии над спортивной ареной, а свободно расположено на самой высокой опоре защитного сооружения;

2) покрытие состоит не из двухпоясных вантовых ферм, а представляет собой многопоясную пространственную тросовую конструкцию. При этом, внешне трёх-четырёхпоясная тросовая конструкция покрытия БСЗС похожа на натянутую на здания многослойную стальную паутину.

В целом, в предлагаемых светопрозрачных сооружениях изменилось лишь зрительное восприятие объекта, но внутренняя суть (идея покрытия) осталась такой же, как на «Минск-Арена» и дворце спорта «Юбилейный».



Рис. 5. Спортивно-развлекательный комплекс «Минск-Арена» в г. Минск

Покрытие «Минск-Арены» запроектировано двухпоясным, выполнено из высокопрочных тросов в виде «велосипедного колеса» и включает в себя замкнутый наружный железобетонный опорный контур, высокопрочные стальные тросы, домкраты, центральное металлическое кольцо диаметром 12 м, металлические трубные стойки-распоры, металлические ребристые плиты покрытия с утеплителем и рулонным водоизоляционным ковром. При этом чистый пролет двухпоясного вантового покрытия в Минске равен всего 116 м и не дает возможности применения светопрозрачного покрытия по причине конструктивных особенностей устройства тросовой системы, изначально рассчитанной только на мягкую кровлю по металлическим плитам и поэтому не обладающей необходимой жесткостью и устойчивостью для размещения светопрозрачного покрытия.

Еще одним недостатком такой тросовой системы для перекрытия больших пролетов являются ограниченные возможности по разнообразию форм и размеров перекрываемого пространства. Поэтому попытки дальнейшего существенного увеличения перекрываемого пролета без изменения технических решений приведут к возникновению ограничений, связанных с недопустимым увеличением прогиба вантового покрытия.

Преимущества многопоясных тросовых систем перед традиционными технологиями, применяющимися при перекрытии больших пролётов, очевидны. Это большая прочность и надёжность, превосходная несущая способность, лёгкость конструкций, возможность перекрывать значительно большие пролёты, лучшая светопропускная способность покрытия, в несколько раз меньшая металлоёмкость конструкций и, как следствие, относительно невысокая стоимость покрытия.

Применение разработанных в России светопрозрачных большепролётных тросовых покрытий не ограничивается спортивными площадками, оно способно серьёзно изменить современную архитектуру и создать благоприятные условия для расширения комфортного пространства для жизни людей.

Таким образом, реализация в полной мере этой идеи – массового строительства защищенных надёжными светопрозрачными оболочками объёмных экологичных пространств – обязательно приведёт к улучшению качества строительных объектов и одновременному сохранению окружающей природной среды. При этом не только реализуются новые перспективные возможности для улучшения комфорта и безопасности жизни человека, но со временем произойдёт значительное улучшение экологичности, энергетической целесообразности и общей привлекательности существующих городов. Хочется верить, что перемены не за горами и за такими (и аналогичными) сооружениями наше будущее.

Повреждение конструкционных материалов, инженерные методы расчета на усталость

Реальные материалы изначально содержат многочисленные повреждения различных размеров – от микроскопических дефектов до крупных пор и макротрещин. Дефекты решетки, трещины и поры различного происхождения и размеров, локальные особенности структуры осложняют картину и приводят к тому, что определение количественных характеристик прочности конструкционных материалов на атомном уровне представляются нереальными [1]. Более реально подойти к установлению прочностных характеристик материалов и прочностных прогнозов на основе механики сплошных сред при интегральном учете особенностей структуры и некоторых общих физических аспектов.

Существует разделение полной долговечности образца на составляющие: стадия возникновения микротрещин, стадия зарождения макротрещин, стадия распространения макротрещин [1]. Процесс разрушения и процессы, предшествующие и сопутствующие его возникновению, зависят от физико-механических характеристик материала, температурно-скоростного режима нагружения, истории изменения и вида напряженно-деформированного состояния.

Распространению одной или нескольких трещин, разделяющих объект на части, предшествует некоторая подготовительная фаза – объемное разрушение – представляющая собой накопление дефектов – микропор, микротрещин, адиабатических полос сдвига, размер которых определяется структурой материала, а скорость накопления – условиями нагружения.

Согласно СНиП 53-100-2010, при проектировании стальных конструкций и их элементов (балки крановых путей, балки рабочих площадок, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, конструкции под двигатели и др.), непосредственно воспринимающих многократно действующие подвижные, вибрационные или другого вида нагрузки с количеством циклов нагружений 10^5 и более, которые могут привести к явлению усталости, следует учитывать требования к материалу, технологии изготовления, применяя такие конструктивные решения, которые не вызывают значительной концентрации напряжений, и проверять расчётом на усталость.

Расчёт на усталость следует производить по формуле:

$$\frac{\sigma_{max}}{\alpha R_v \gamma_v} \leq 1, \quad (1)$$

где σ_{max} – наибольшее по абсолютному значению напряжение в рассчитываемом элементе, вычисленное по сечению нетто без учёта коэффициента динамичности;

R_v – расчётное сопротивление усталости, принимаемое в зависимости от временного сопротивления стали R_{un} и групп элементов и соединений конструкций;

α – коэффициент, учитывающий количество циклов нагружений n .

γ – коэффициент, зависящий от напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений $\rho = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ (здесь σ_{min} –

наименьшее по абсолютному значению напряжение в рассчитываемом элементе, вычисляемое так же и при том же нагружении, как и σ_{max}). При разнозначных напряжениях σ_{max} и σ_{min} значение коэффициента ρ следует принимать со знаком «минус».

Данная методика имеет ряд недостатков:

1. Количество циклов нагружения учитывается только с помощью коэффициента α , искусственно понижающего значение расчетного сопротивления усталости. Практически же это означает, что работа материала приравнивается к статической, но с меньшим запасом прочности, то есть при расчете по формуле (1) получаем модель материала, способного сколь угодно долго нести расчетную нагрузку. Тем не менее, количество циклов, приводящих к разрушению материала, имеет место быть как при мало-, так и при многоциклового усталости.

Рассмотрим упругую квадратную пластину, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой σ (рис.1).

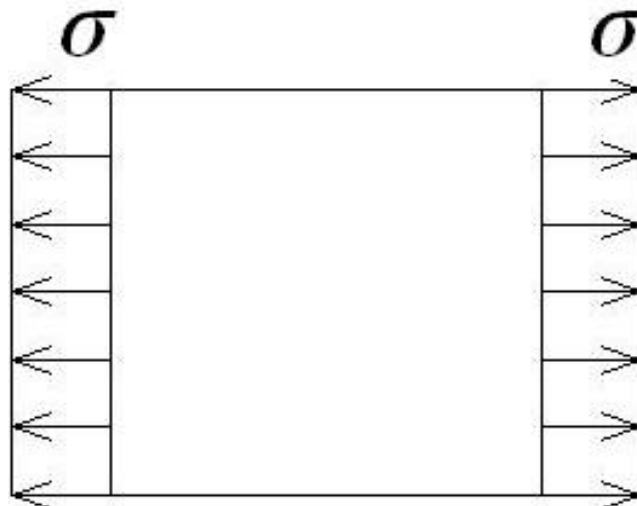


Рис.1. Пластина, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой

Исходя из положений сопротивления материалов, напряжение в любой точке пластины будет равным σ . Рассмотрим пластину с такими же размерами, в которой имеется отверстие, диаметр которого значительно меньше стороны квадрата. Поля напряжений, полученные путем расчета

пластины по методу конечных элементов, приведены на рис.2.

Анализируя выполненные расчеты видно, что значение напряжений возросло примерно в 3 раза. Это означает, что любой дефект в материале конструкции будет являться концентратором напряжений, предел прочности в которых будет наступать значительно раньше, чем в конструкции в целом. Это еще означает, что при многократном повторении нагружения любой дефект будет увеличиваться и приближать выход конструкции из строя. При наличии дефектов, отличных от окружности, имеет место еще более значительное увеличение напряжений.

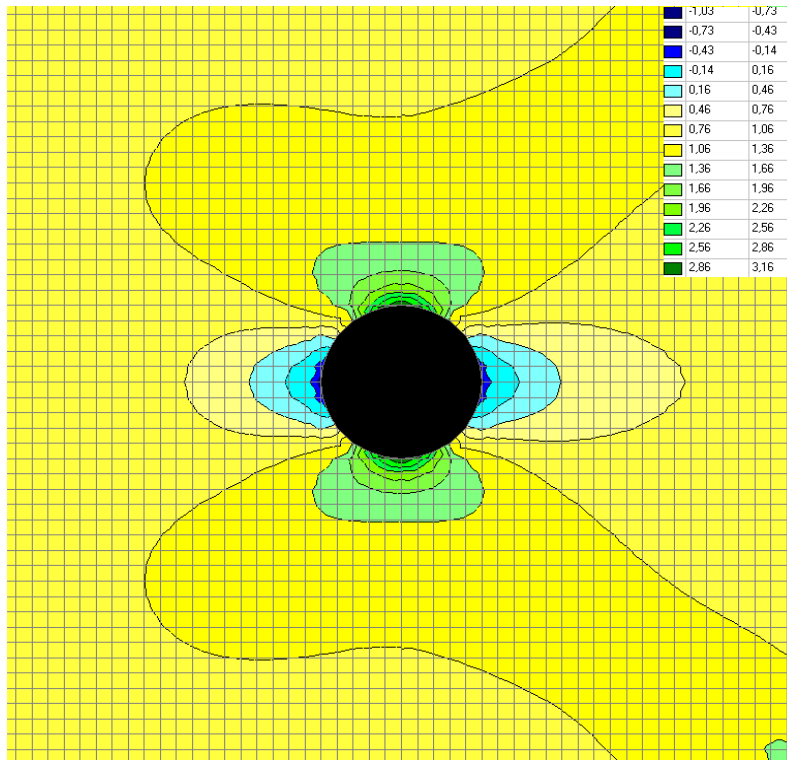


Рис.2. Поля напряжений в пластине, имеющей круглое ослабление

2. При расчете по формуле (1) учет напряженно-деформированного состояния (НДС) происходит лишь путем введения коэффициента γ , то есть возникновение в системе того или иного НДС считается статическим. При этом не учитывается как именно возникло данное НДС, которое, строго говоря, может возникать как при постепенном увеличении нагрузки, так и при перемещении нагрузок в определенное положение. Характер изменения тензора напряжений в этих случаях будет различным, что в свою очередь может оказывать влияние на усталостные свойства материала. Такой вывод можно сделать на основании эксперимента, проведенного в ЦНИИСК им. Кучеренко [3].

В ходе эксперимента испытывались модели реальной подкрановой балки пролетом 6 м, изготовленные в масштабе 2:1. Эксперимент проводился в 2 вариантах: при нагружении модели балки в гидропульсаторе под эксцентричной нагрузкой в фиксированном сечении, а так же в специальной установке под эксцентричной подвижной

нагрузкой. При этом амплитудное значение эксцентричной нагрузки совпадало по модулю со значением подвижной нагрузки, которая была много меньше разрушающей. Таким образом, максимальные значения напряжений, зарегистрированные в обоих экспериментах, совпадали. Тем не менее, получить усталостную трещину удалось лишь в случае с подвижной нагрузкой [3].

Возможной причиной этого является разница в изменении тензора напряжений. В случае с неподвижной нагрузкой, изменяемой по модулю, все компоненты тензора напряжений изменяются пропорционально величине нагрузки. В случае с подвижной нагрузкой изменение тензора напряжений в наиболее нагруженном сечении имеет гораздо более сложный характер. Линии влияния компонентов тензора напряжений в этом случае имеют очертание, изображенное на рис. 3. Таким образом, характер совместного изменения компонентов тензора напряжений может играть важную роль при вычислении остаточного ресурса конструкции.

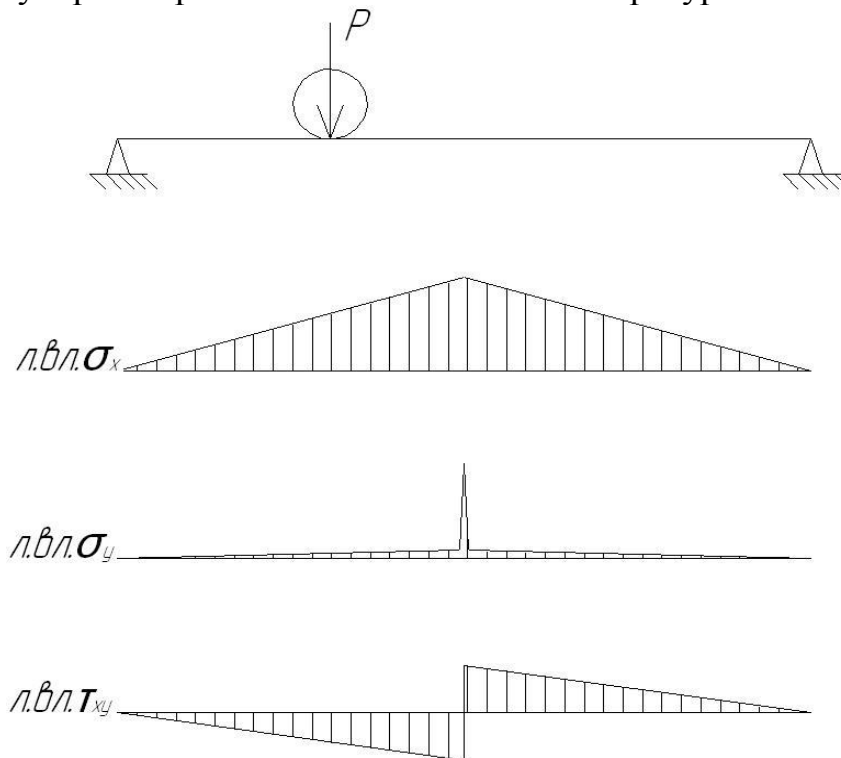


Рис.3. Линии влияния напряжений при подвижной нагрузке

3. Не учитывается история нагружений, которая зависит не только от числа циклов, но и от того, насколько полными они являлись.

Таким образом, используя данную методику расчета невозможно определить оставшийся и выработанный ресурс стальной конструкции. Наоборот, при анализе формулы (1) можно прийти к выводу, что ресурс материала является бесконечным, что опровергается проводимыми испытаниями моделей балок и практическими исследованиями.

Литература

1. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения/ Л.М. Качанов.– М.: Наука, 1974. – 311 с.
2. Коллин, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение/ Дж. Коллинз.– М.: Мир, 1984.
3. Горпинченко, В.М. Экспериментальное исследование усталостной прочности сварной подкрановой балки/ В.М.Горпинченко, А.С. Лазарян // Промышленное строительство. - 1975. - №12.
4. Горев, В.В. Металлические конструкции. Т. 2. Конструкции зданий/ В.В. Горев – М. : Высш. шк., 2004. – 551 с.

**ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЕ. ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЯ.
ВОДОСНАБЖЕНИЕ И ВОДООТВЕДЕНИЕ. ГИДРАВЛИКА.
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

УДК 628.162.1

Н.С. Ватутин

**Зарубежные методы обезжелезивания подземных вод.
Метод «Виредокс»**

Вода является самым крепким и устойчивым соединением в природе двух химических элементов, водорода и кислорода. Вода необходима для существования всех живых организмов и микроорганизмов на Земле. Вода – ценный источник и ресурс для поддержания жизни. Но в современном урбанизированном мире все актуальнее становится проблема обеспечения водой крупных городов. Причем проблема рассматривается не только в количественном, но и в качественном варианте. Важность качественного водоснабжения напрямую определяет здоровье и благополучие нации в целом. Россия в этой сфере занимает устойчивое положение, так как находится на втором месте в мире по запасам чистой питьевой воды. Однако рост промышленного производства, рост потребления воды населением для хозяйственно – питьевых целей заставляет задуматься о поиске альтернативных источников водоснабжения лучшего качества и степени надежности. Так, по степени загрязненности воды рек Волги и Оки относятся ко второму классу [2]. Большую нагрузку на степень качества воды оказывают бытовые стоки и производственные стоки. Очистные сооружения полностью не способны справиться с поставленной задачей. Каждый кубический метр плохо очищенной бытовой или производственной сточной воды, сбрасываемой в реку, загрязняет 60 м³ чистой воды. Основные загрязнения идут со стороны промышленной зоны и прилегающей к ней территории города Дзержинска. В мае 2010 года, было выявлено, что знаменитое «белое море» в районе ОАО Капролактама, служащее для сбора всех загрязненных вод промпредприятий, находилось на критически коротком расстоянии от реки Оки, что была велика опасность попадания химикатов в реку. Последствия были бы катастрофическими для всего Приволжского федерального округа. Этот пример еще раз показывает необходимость в более надежном и менее доступном для человека источнике водоснабжения. Несомненно, таковым является подземный источник воды. Уже много лет наука рассматривает этот метод водоснабжения как один из наиболее перспективных. Подземное водоснабжение широко осуществляется в малых городах, поселках и частных хозяйствах. Единственным большим минусом этого вида водоснабжения является высокая концентрация железа в воде. Об

этом говорит высокая мутность воды и желтовато – коричневый цвет с неприятным запахом. Концентрация железа в подземных водах зависит от региона. В Нижегородском регионе концентрация растворенных соединений железа в воде составляет от 10 до 18 мг/л, что достаточно высоко. В России существует много методов очистки воды от загрязнений растворенного железа, которые делятся на две основные группы: реагентные и безреагентные. При помощи этих методов в отдельности каждого или комбинации нескольких, концентрация железистых соединений в воде доводится до ПДК, которое для России составляет 0,3 мг/л. Для зарубежных западных стран, ПДК по железу равно 0,1 мг/л [1].

В зарубежной практике удаление двухвалентного железа из подземных вод, содержащих органические вещества, иногда осуществляется методом контактового фильтрования. Материал контактового фильтра оказывает каталитическое действие на процесс окисления железа. При каталитическом окислении двухвалентного железа происходит химическое связывание его с фильтрующим материалом и образование железо – органических комплексов не происходит, если в подземных водах, не содержащих растворенного кислорода, двухвалентное железо и органическое вещество находятся раздельно. Для ускорения процесса и полноты окисления закисного железа в качестве катализаторов используются высшие окислы марганца («черный песок»), железа и некоторые природные соединения. При содержании в воде железа преимущественно в ионных формах возможно успешное удаление его из раствора методом катионирования. В производственных и полупроизводственных условиях в качестве ионо-обменников используются катионы различных марок, сульфоугли, активизированные угли, бентонитовые глины и другие фильтрующие материалы, обладающие значительной емкостью обмена. Однако применение этого метода ограничено дороговизной фильтрующего материала, сложностью технологического процесса в связи с необходимостью сравнительно частой регенерации фильтра. Из перспективных методов очистки подземных вод от железа следует отметить магнитную обработку воды. При этой обработке воды в основном происходят изменения структуры молекул самой воды и гидратных оболочек ионов. Такие изменения могут приводить к образованию дополнительных центров кристаллизации, и в конечном итоге происходит ускорение процессов коагуляции. На эффект обработки воды влияют, в первую очередь, магнитная восприимчивость ионов, напряженность и скорость изменения направления магнитного поля, а также скорость пропускания обрабатываемой воды. В связи с этим, практическому применению метода на каком-либо водозаборе необходима предварительная экспериментальная выработка режимов работы установки в лабораторном варианте.

В последние годы в зарубежной литературе широко обсуждается способ очистки воды от железа непосредственно в водоносном горизонте. В

1969 г. Х. Вихури была опубликована статья, в которой сообщалось об успешном проведении опытов по удалению железа из грунтовых вод (in situ) посредством воздействия на их окислительно-восстановительные условия. Затем на Международной выставке по охране вод, проходившей в 1970 г. в г. Енкепинге (Швеция), фирмой «Вирметодор А.Б.» демонстрировалась модель установки по очистке грунтовых вод от железа методом «Виредокс» (Vyredox) [3]. Принцип его заключается в том, что железо, находящееся в подземных водах в растворенной форме, окисляется непосредственно в водоносном горизонте посредством введения лишенной железа и насыщенной кислородом воды через специальные скважины (трубчатые фильтры) для окисления, которые закладываются вокруг водозаборной скважины на расстоянии 10-15 м. В некоторых вариантах установки трубчатые фильтры вокруг водозаборной скважины служат для нагнетания кислорода. Кислород или вода, обогащенная кислородом от специальной установки, поступает через трубчатые фильтры для нагнетания в водоносный горизонт. В результате подземной аэрации воды водоносного слоя равновесие процессов окисления – восстановления сдвигается в сторону окисления и железо, гидролизуясь, переходит в осадок, а грунт водоносного горизонта одновременно служит в качестве фильтра. Метод не сразу нашел поддержку у специалистов по водоподготовке, однако положительный и теперь уже многолетний опыт эксплуатации «виредоксных» установок в ряде стран дает основание считать этот метод перспективным. Отсутствие же теоретического обоснования метода требует для каждого конкретного природных условий убедительного обоснования возможных последствий его применения. Метод «Виредокс» может быть рекомендован в первую очередь в случаях неглубокого залегания горизонта грунтовых вод, и в сравнении с другими методами очистки вод от железа достигается большая экономия капитальных затрат.

Литература

1. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества : утв. 26.09.01. – Екатеринбург : ИД «Урал Юр Издат», 2008. – 96 с. – (Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы).
2. ГОСТ 2761-84. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. – Переизд. март 1994 с изм. № 1. – Взамен ГОСТ 17.1.3.03-77 ; Введ. 01.01.86. – М. : ГУП ЦПП, [б.г.]. – 16 с.
3. Труфанов, А.И. Формирование железистых подземных вод/ А.И. Труфанов; под редакцией Маринова Н.А. – М.: Наука, 1982. – 139 с.
4. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : СНиП 2.04.02-84* : изм. № 1, утв. от 30.04.86 : утв. Госстроем СССР 27. 07.84 : взамен СНиП II-31-74 : введ. в д. 01.01.85 / Госстрой России. – Изд. офиц. – М. : ФГУП ЦПП, 2007. – 128 с.

Технологии биологического удаления азота и фосфора

Интенсивное развитие промышленности, улучшение степени благоустроенности городов и поселков и их быстрый рост привели к тому, что снижается эффективность очистки воды, в том числе и от биогенных элементов (соединения азота и фосфора). Поэтому в настоящее время необходима разработка и осуществление программ технического перевооружения.

В последние два десятилетия в мировой практике в области удаления азота и фосфора из сточных вод достигнуты существенные успехи. Созданы технологические схемы и математические описания процессов удаления биогенных элементов.

В России в основном применяются технологии биологического удаления азота и фосфора. Их особенность заключается в том, что микроорганизмы, аккумулирующие фосфор в анаэробных условиях, выделяют его в сточную воду в растворенном виде. В соответствии с общепринятой технологией обработки осадка избыточный активный ил подлежит гравитационному уплотнению в течение нескольких часов. Этого времени достаточно для того, чтобы весь фосфор, накопленный в нем в виде полифосфатов, перешел в растворенное состояние. Поэтому при проектировании очистных сооружений необходимо учитывать эту особенность и включать в технологическую цепочку сооружения по химическому осаждению фосфора.

Удаление биогенных элементов путем биологической очистки без применения реагентов является наиболее перспективным. Значительно снижаются эксплуатационные расходы на химические реагенты, уменьшается количество образующегося осадка, снижаются транспортные и другие затраты и в результате происходит снижение химической нагрузки на окружающую среду, так как остатки химических реагентов при сбросе очищенных сточных вод не попадают в водоемы и на полигоны складирования. Однако эффективность чисто биологических методов удаления фосфатов невысока и в редких случаях превышает 75%.

Процесс глубокой нитрификации сточных вод, содержащих NH_4 независимо от исходной концентрации аммонийного азота, эффективно протекает в аэротенках – смесителях при соблюдении строго определенного возраста активного ила, который для различных условий может измениться от 5 до 70 и более суток.

При осуществлении процесса нитрификации в отсутствие или недостатке органического субстрата для построения биомассы нитрифицирующих микроорганизмов требуется искусственная добавка

источников неорганического углерода в виде HCO_3^- или CO_2 из расчета 2 мг·экв окисленного аммонийного азота.

Оптимальная величина pH для нитрифицирующих микроорганизмов составляет 8,4; оптимальная температура 30 °С. При температуре менее 30 °С наблюдается снижение скорости нитрификации. Процесс нитрификации может осуществляться как в присутствии органических веществ, так и в их отсутствии. Особое внимание следует обратить на присутствие в сточных водах веществ, тормозящих или полностью ингибирующих нитрификацию, в частности свободного аммиака и тяжелых металлов.

В качестве органического субстрата в процессе денитрификации могут быть использованы любые биологически окисляемые органические соединения углеводов (спирты, органические кислоты, продукты распада белков, избыточный активный ил и т.д.). Источником углеродного питания при очистке сточных вод методом нитрификации могут быть исходные или прошедшие очистку в первичных отстойниках сточные воды, а также органосодержащие производственные сточные воды, предпочтительно не содержащие аммонийного, органического и белкового азота.

Необходимое соотношение величины $\text{БПК}_{\text{полн}}$ в сточных водах к нитратному азоту ориентировочно равно 4:1.

Для процессов нитрификации и денитрификации могут быть использованы обычные сооружения биологической очистки: аэротенки и биофильтры.

При удалении соединений азота из сточных вод могут применяться различные схемы очистки: одностадийные, двух- или трехстадийные. В каждой схеме процесс денитрификации может осуществляться в начале, середине или конце сооружения с искусственной добавкой субстрата (например метанола) или с использованием субстрата сточных вод с проведением процесса денитрификации в аэробных и анаэробных условиях с дополнительной рециркуляцией иловой смеси в начало резервуара из его конца или вторичного отстойника, а также из одной ступени в другую. Во всех схемах на завершающей стадии устраивают, как правило, аэрацию иловой смеси продолжительностью не менее 1-2 ч для отдувки газообразного азота и более глубокого окисления аммонийного азота.

Одним из приемов предупреждения эвтрофирования водных объектов является удаление из очищенных сточных вод фосфора. В процессе обычной биологической очистки соединения фосфора удаляются не полностью. Благодаря бактериальному воздействию полифосфаты превращаются в ортофосфаты.

Для достижения 90% эффективности удаления фосфатов из сточных вод необходимо выполнение следующих условий:

- В аэротенках по возможности должна поддерживаться постоянная оптимальная органическая нагрузка, равная 50 кг БПК на 100 кг твердых

частиц. Это обеспечивается стабилизацией потока необработанных сточных вод в резервуары, а также регулировкой процесса перекачивания активного ила.

- Концентрация растворенного кислорода в центре аэротенка должна поддерживаться на уровне 2 мг/дм^3 , а на выходе -5 мг/дм^3 .

- Обогащенный фосфатами отбрасываемый активный ил необходимо обрабатывать отдельно и не включать в процесс первичной и вторичной обработки (обработку проводят помещая ил в анаэробные условия или в условия низких рН).

Наиболее глубокая очистка от фосфора (85-90%) обеспечивается в схеме с анаэробной обработкой рециркулирующего активного ила. Недостатком является наличие специальной емкости, в которой возвратный активный ил после вторичного отстойника перед подачей в аэротенк подвергается анаэробной обработке.

Практически единственным применимым методом удаления соединений азота из городских сточных вод является биологическая нитро-денитрификация.

Механизм нитрификации и денитрификации с взвешенной микрофлорой изучен достаточно полно как за рубежом, так и нашими учёными (Яковлевым С. В., Бондаревым А. А., Кирюхиной Т. А. и др.).

Лабораторными исследованиями, выполненными в НИИ КВОВ, показана перспективность применения для очистки городских сточных вод двухступенчатой нитро-денитрификации с взвешенной микрофлорой с использованием в качестве субстрата органических веществ очищаемой воды. Практическое применение технологии требовало опытно-промышленной разработки методик расчёта сооружений.

Одним из современных направлений развития технологии биологической очистки сточных вод является использование иммобилизованной микрофлоры для ускорения процессов биологической очистки и повышения качества очищенной воды, в том числе, от соединений азота. Исследования в этом направлении широко ведутся как в нашей стране (НИИ ВОДГЕО, НИИ КВОВ и др.), так и за рубежом однако задача глубокого изъятия аммония солевого до настоящего времени не ставилась.

За рубежом для совместного удаления из сточных вод соединений азота и фосфора широко ведутся исследования одноилловых систем, сочетающих технологии удаления фосфора биологическим методом и азота методом нитро-денитрификации (НД).

Большой интерес к этим технологиям объясняется желанием максимально использовать биологический потенциал активного ила. Однако многочисленные данные свидетельствуют, что такие схемы очистки наиболее эффективны и работают стабильно при высоких исходных концентрациях органических веществ в сточной воде. Эта биотехнология требует поддержания в аэротенке достаточно высокого

возраста активного ила, необходимого для развития нитрифицирующих бактерий. В свою очередь, для удаления из стоков фосфора наилучшие результаты дает технология биологической дефосфотации (БДФ), позволяющая достигать остаточные концентрации фосфатов в очищенной сточной воде на уровне ПДК для водоёмов рыбохозяйственной категории водопользования.

Возможность обеспечить нормативное качество сточных вод на сбросе в водоём появляется при совместном применении технологии НД и БДФ. Однако отечественный опыт использования БДФ очень ограничен, закономерности процесса изучены недостаточно. В частности, остаётся мало изученным вопрос влияния на БДФ такого важного технологического параметра, как возраст активного ила.

Таким образом, для выделения процесса с биоудалением фосфора требуется наличие аэробной, аноксичной и анаэробной зон: глубокое удаление фосфора связано с селекцией определенных видов микрофлоры, обусловленной в свою очередь, наличием соответствующей схемы и технологическими приемами: присутствие нитратов в сточных водах на анаэробной стадии обработки нарушает процесс выделения фосфора.

Осуществление реконструкции и технического перевооружения сооружений по очистке производственных и городских сточных вод – одна из наиболее сложных инженерных задач, направленная на улучшение экологической обстановки в различных регионах России и охрану водоемов от загрязнения и истощения. Вышеизложенные методы биологического удаления азота и фосфора из сточной воды позволяют достигать нормативных показателей, определяемых природоохранными органами, и обеспечивать защиту водоемов – приемников сточных вод.

Литература

1. Dirk, B. G. Carbon and struvite recovery from centrate at a Biological Nutrient Removal Plant / B.G. Dirk, H. Kelly, F. Koch, D.S. Mavinic, B. Rezaniaand, B. Drew // IWA Publishing. – London, UK. – 2004. – 16 p.
2. Jeyanayagam, S. True Confessions of the Biological Nutrient Removal Process/ S. Jeyanayagam // Florida water resources journal. – 2005. – P. 37-46.
3. Черненко, Я. Н. Интенсификация процессов биологической очистки сточных вод/ Я. Н. Черненко, Н. Д. Волошин // «Экология и промышленность России». – 1998. – № 8 (авг.). – С. 33-36.
4. Демидов, О. В. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод/ О. В. Демидов // «Водоснабжение и санитарная техника». – 1996. – № 3. – С. 16-18.
5. Демидов, О. В. Интенсификация процесса биологической очистки сточных вод с использованием иммобилизованных микроорганизмов/ О.В. Демидов // Стр-во и архитектура : экспресс-информ. Свод. т. / ВНИИТПИ. Сер. Инж. обеспечение объектов стр-ва. – М., 1996. – Вып. 4. – С. 18-27.

Использование геотермальных ресурсов в энергетике России

Основными направлениями развития генерирующих мощностей в энергетике страны на ближайшую перспективу являются техническое перевооружение и реконструкция электростанций, а также ввод новых генерирующих мощностей. Прежде всего – это строительство парогазовых установок с КПД 55...60%, что позволит повысить эффективность существующих ТЭС на 25...40% (отн.). Следующим этапом должно стать сооружение тепловых электростанций с использованием новых технологий сжигания твердого топлива и со сверхкритическими параметрами пара для достижения КПД ТЭС, равного 46...48%. Дальнейшее развитие получат и атомные электростанции с реакторами новых типов на тепловых и быстрых нейтронах.

Важное место в формировании энергетики России занимает сектор теплоснабжения страны, который является самым большим по объему потребляемых энергоресурсов – более 45% их общего потребления. В системах централизованного теплоснабжения (ЦТ) производится более 71%, а децентрализованными источниками – около 29% всего тепла. Электростанциями отпускаются более 34% всего тепла, котельными – примерно 50%. В соответствии с энергетической стратегией России до 2020 г. планируется рост теплопотребления в стране не менее чем в 1,3 раза, причем доля децентрализованного теплоснабжения будет возрастать с 28,6% в 2000 г. до 33% в 2020 г.

Повышение цен, которое произошло в последние годы, на органическое топливо (газ, мазут, дизельное топливо) и на его транспортировку в отдаленные районы России и соответственно объективный рост отпускных цен на электрическую и тепловую энергию принципиально изменяют отношение к использованию возобновляемых источников энергии: геотермальной, ветровой, солнечной и энергии биомассы.

Так, развитие геотермальной энергетики в отдельных регионах страны позволяет уже сегодня решать проблему электроснабжения и теплоснабжения, в частности, на Камчатке, Курильских островах, а также на Северном Кавказе и в отдельных районах Сибири и европейской части России.

В числе основных направлений совершенствования и развития систем теплоснабжения должно стать расширение использования местных нетрадиционных возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, геотермального тепла Земли. Уже в ближайшие 7-10 лет с помощью современных технологий локального теплоснабжения благодаря геотермальному теплу можно сэкономить значительные ресурсы органического топлива.

Геотермальные ресурсы

Наряду с огромными ресурсами органического топлива Россия располагает значительными запасами тепла Земли, которые могут быть приумножены за счет геотермальных источников, находящихся на глубине от 300 до 2500 м в основном в зонах разломов земной коры.

Территория России хорошо исследована, и сегодня известны основные ресурсы тепла Земли, которые имеют значительный промышленный потенциал, в том числе и энергетический. Более того, практически везде имеются запасы тепла с температурой от 30 до 220°C : Северо-Кавказский и Поволжский район (1900х1010МВт-ч), Западно-Сибирский район (3093х1010МВт-ч), Северо-Западно-Сибирский район, Северный район (773х1010МВт-ч), Дальневосточный район (5000х1010МВт-ч), Центрально-Чернозёмный район (57х1010МВт-ч), Восточно-Сибирский район (1514х1010МВт-ч), а прогнозные ресурсы Курильско-Камчатского геотермального района оцениваются в 2000 МВт(э). Разведано 47 геотермальных месторождений с запасами термальных вод, которые позволяют получить более 240 т/сут, и производительностью более 105 т/сут. Сегодня в России проблемами использования тепла Земли занимаются специалисты почти 50 научных организаций.

Для использования геотермальных ресурсов пробурено более 3 000 скважин. Стоимость исследований геотермии и буровых работ, уже выполненных в этой области, в современных ценах составляет более 4 млрд. дол. Так, на Камчатке на геотермальных полях уже пробурено 365 скважин глубиной от 255 до 2266 м и израсходовано (еще в советское время) около 300 млн. дол. (в современных ценах). По данным Института вулканологии ДВО РАН, уже выявленные геотермальные ресурсы позволяют полностью обеспечить Камчатку электричеством и теплом более чем на 100 лет. Наряду с высокотемпературным Мутновским месторождением мощностью 300 МВт(э) на юге Камчатки известны значительные запасы геотермальных ресурсов на Кошелевском, Большом Банном, а на севере – на Киреунском месторождениях. Всего на этих месторождениях можно получить около 2 000 МВт(э). Запасы тепла геотермальных вод Камчатки оцениваются в 5000 МВт (тепловых).

На Чукотке также имеются значительные запасы геотермального тепла (на границе с Камчатской областью), часть из них уже открыта и может активно использоваться для энергообеспечения близлежащих городов и поселков.

Курильские острова также богаты запасами тепла Земли, их вполне достаточно для тепло- и электрообеспечения этой территории в течение 100-200 лет. На острове Итуруп обнаружены запасы двухфазного геотермального теплоносителя, мощности которого [130 МВт(э)] достаточно для удовлетворения энергопотребностей всего острова в ближайшие 100 лет. Здесь на Океанском геотермальном месторождении

уже пробурены скважины и строится ГеоЭС. На южном острове Кунашир имеются запасы геотермального тепла, которые уже используются для получения электроэнергии и теплоснабжения г. Южно-Курильска. Недра северного острова Парамушир менее изучены, однако известно, что и на этом острове есть значительные запасы геотермальной воды температурой от 70 до 95°C; здесь также строится ГеоТС мощностью 20 МВт(э).

На Северном Кавказе хорошо изучены геотермальные месторождения с температурой в резервуаре от 70 до 180°C, которые находятся на глубине от 300 до 5000 м. Здесь уже в течение длительного времени используется геотермальная вода для теплоснабжения и горячего водоснабжения. В Дагестане в год добывается более 6 млн.м³ геотермальной воды. На Северном Кавказе около 500 тыс. чел. используют геотермальное водоснабжение.

Приморье, Прибайкалье, Западно-Сибирский регион также располагают запасами геотермального тепла, пригодного для широкомасштабного применения в промышленности и сельском хозяйстве.

Область применения геотермальных теплоносителей

Геотермальные теплоносители (вода, пароводяная смесь или пар) в диапазоне температур 10...300°C могут быть использованы весьма эффективно в энергетике, в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, бальнеологии и т.д.

Первая паровая геотермальная турбина мощностью 200 кВт была пущена в эксплуатацию в 1904 г. в Италии (Лордерелы). В настоящее время геотермальная энергия для производства электроэнергии и тепла используется уже в 58 странах.

В табл. 1 приведены данные об установленных мощностях и производстве энергии на геотермальных полях мира на конец 2000 г. Америка (в основном США, Мексика) и Азия (в основном Филиппины, Индонезия, Япония) производят более 80% всей геотермальной электроэнергии мира. В настоящее время установленная мощность на ГеоЭС превысила 100000 МВт(э).

Таблица 1

Производство электроэнергии и тепла с использованием геотермальных ресурсов

Континент	Электричество			Тепло		
	Установленная мощность, МВт(э)	Общее производство		Установленная мощность, МВт(т)	Общее производство	
		ГВт • ч/год	%		ГВт • ч/год	%
Африка	54	397	1	125	504	1
Америка	3390	23 342	47	4355	7270	14
Азия	3095	17510	35	4608	24235	46
Европа	998	5745	12	5714	18905	35
Океания	437	2269	5	342	2065	4
Итого	7974	49263	100	15 144	52979	100

В последние годы к этим странам присоединился Китай, где активно развиваются системы локального теплоснабжения на основе низкопотенциального геотермального тепла. Он стал лидером в прямом использовании геотермального тепла (отопление бассейнов, разведение рыб), ежегодный прирост устанавливаемых мощностей не менее чем на 10%. При этом следует отметить, что Китай практически не имеет геотермальных ресурсов для ГеоЭС.

В Японии работают 12 ГеоЭС общей мощностью около 600 МВт(э); 80% бассейнов и туристических комплексов страны также используют геотермальную воду. В условиях ожидаемого глобального потепления вызванного воздействием выбросов в атмосферу, в первую очередь (CO_2) перевооружение отечественной энергетики должно базироваться на наиболее развитых технологиях производства электроэнергии и тепла. Создание геотермальных систем теплоснабжения позволит сократить количество котельных на органическом топливе и снизить выбросы в атмосферу. Геотермальные электростанции – самое экологически чистое производство электроэнергии (и тепла). Сегодня в России создана первая в мире экологически чистая электрическая станция Верхне-Мутновская ГеоЭС, которая не имеет практически никаких выбросов в атмосферу, так как геотермальный теплоноситель, совершив работу в технологической схеме станции, полностью (вместе с газами) закачивается в землю.

Сегодня в мире активно обсуждается размер налога на 1 т CO_2 выбрасываемого в атмосферу; по оценкам разных авторов он колеблется от 1 до 30 дол. за 1 т CO_2 . Некоторые страны в ближайшие годы не смогут снизить количество выбросов в атмосферу до уровня 1990 г. и в соответствии с Киотским соглашением 1992 г. вынуждены будут покупать квоты у других стран. В связи с этим они стремятся установить минимальный налог на выброс CO_2 в атмосферу. У России есть все условия для сохранения общего объема выбросов на современном уровне и активного участия на рынке квот CO_2 .

Введение налога на выброс CO_2 в атмосферу коренным образом меняет технико-экономическое обоснование выбора электростанций (КЭС, ТЭЦ и ГеоЭС) в пользу геотермальных станций.

Стоимость вырабатываемой электростанциями энергии

Расходы на исследования и разработку (бурение) геотермальных полей составляют до 50% всей стоимости ГеоЭС, и поэтому стоимость электроэнергии, вырабатываемой на ГеоЭС, довольно значительна. Так, стоимость всей опытно-промышленной (ОП) Верхне-Мутновской ГеоЭС [мощность 12(3x4) МВт] составила около 300 млн. руб. Однако отсутствие транспортных расходов на топливо, возобновляемость геотермальной энергии и экологическая чистота производства электроэнергии и тепла позволяют геотермальной энергетике успешно конкурировать на энергетическом рынке и в некоторых случаях производить более дешевую

электроэнергию и тепло, чем на традиционных КЭС и ТЭЦ. Для удаленных районов (Камчатка, Курильские острова) ГеоЭС имеют безусловное преимущество перед ТЭЦ и дизельными станциями, работающими на привозном топливе.

Если в качестве примера рассматривать Камчатку, где более 80% электроэнергии производится на ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2, работающих на привозном мазуте, то использование геотермальной энергии более выгодно. Даже сегодня, когда еще идет процесс строительства и освоения новых ГеоЭС на Мутновском геотермальном поле, себестоимость электроэнергии на Верхне-Мутновской ГеоЭС более чем в 2 раза ниже, чем на ТЭЦ в Петропавловске-Камчатском. Стоимость 1 кВт ч(э) на старой Паужетской ГеоЭС в 2-3 раза ниже, чем на ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2.

Совершенно ясно, что экономика Камчатки не может успешно развиваться без снижения стоимости по электроэнергии, а этого можно достичь путем использования геотермальных ресурсов.

Сейчас, перестраивая энергетику, очень важно исходить из реальных цен на топливо и оборудование, также цен на энергию для разных потребителей. В противном случае можно прийти к ошибочным выводам, прогнозам. Так, в стратегии развития энергетики Камчатской области, разработанной в 2001 г. в «Дальсетьпроекте», без достаточных обоснований за 1000 м газ была заложена цена 50 дол., хотя ясно, что реальная стоимость газа будет не ниже 100 дол., а продолжительность освоения газовых месторождений будет составлять 5-10 лет. При этом согласно предложенной стратегии запасы газа рассчитываются на срок эксплуатации не более 12 лет. Поэтому перспективы развития энергетики Камчатской области должны быть связаны в первую очередь со строительством серии геотермальных электрических станций на Мутновском месторождении [до 300 МВт (э)], перевооружением Паужетской ГеоЭС, мощность которой должна быть 20 МВт, и строительством новых ГеоЭС, которые обеспечат энергетическую независимость Камчатки на многие годы (не менее 100 лет) и позволят снизить стоимость продаваемой электроэнергии.

Согласно оценке Мирового Энергетического Совета из всех возобновляемых источников энергии самая низкая цена за 1 кВт·ч у ГеоЭС. Из опыта эксплуатации крупных ГеоЭС на Филиппинах, Новой Зеландии, в Мексике и в США следует, что себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии часто не превышает 1 цента, при этом следует иметь в виду, что коэффициент использования мощности на ГеоЭС достигает значения 0,95.

Геотермальное теплоснабжение наиболее выгодно при прямом использовании геотермальной горячей воды, а также при внедрении тепловых насосов, в которых может эффективно применяться тепло Земли с температурой 10...30°C, т.е. низкопотенциальное геотермальное тепло.

Литература

1. Богуславский, Э.И. Тепловые ресурсы недр России/ Э.И. Богуславский // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С.25-32.
2. Поваров, О.А. Всемирный геотермальный конгресс/ О.А. Поваров, Г.В. Томаров // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С.74-77.
3. Бутузов, В.А. Анализ геотермальных систем теплоснабжения России/ В.А. Бутузов // Промышленная энергетика. – 2002. – № 6. – С.53-57.

УДК 628.162.1

Н.С. Ватугин

Гидропневматические установки в системах водоснабжения автономных объектов из подземного источника

В наше время все большую популярность набирают подземные источники воды для водоснабжения поселков, ферм, усадеб. Эти автономные объекты имеют, как правило, самостоятельные системы водоснабжения, которые забирают воду из подземного источника и имеют одну или несколько, в зависимости от масштабов объекта, водозаборных скважин, объединенных в единую систему, либо образующих несколько обособленных систем забора, накопления и распределения воды. Далее вода проходит водоподготовку и поставляется потребителю для хозяйственно – питьевого использования. Подземные воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, должны подвергаться очистке в той или иной степени – в зависимости от качества забираемой из подземных источников воды [3]. Как правило, подземную воду необходимо очищать от железа и, реже, марганца с доведением их остаточных концентраций до требуемых норм [4]. Кроме того, системы водоснабжения подобных объектов из подземных источников в своем составе имеют водонапорную башню, играющую роль аккумулятора воды и одновременно регулятора напора в системе водоснабжения. Строительство и эксплуатация водонапорных башен в системах водоснабжения отдельно стоящих объектов не во всех случаях является оправданным техническим решением, однако всегда увеличивает стоимость строительства и эксплуатации системы водоснабжения объекта. Поэтому, при выборе установки водоподготовки, она должна удовлетворять как минимум двум основным задачам: поддержанию необходимого давления в сети трубопровода, а также очистке подземных вод от примесей соединений железа и марганца. Таким типом установок являются гидропневматические установки.

Гидропневматические установки в силу своих особенностей и преимуществ являются наиболее совершенным, экономичным и

целесообразным оборудованием для систем водоснабжения объектов различного назначения практически с любым режимом водоразбора во внутренних водопроводах. Традиционные технологии очистки подземных вод для питьевых целей от соединений железа и марганца включают две основные стадии: окисление растворенных форм (различные способы аэрации) и выделение их из воды в виде нерастворимых осадков, как правило, фильтрованием. Зачастую системы водоснабжения отдельных стоящих объектов (жилые дома, санатории, дома отдыха и т. п.) включают гидропневматические установки различных типов, устраиваемые для поддержания давления в системе водоснабжения и работающие в автоматическом режиме. При использовании гидропневматических установок легко можно автоматизировать включение и выключение насосных агрегатов, задействованных в данной системе. Кроме того, их стоимость невысока и они не требуют капитальных затрат при установке.

Известно, что гидропневматические установки могут быть переменного и постоянного давления. В общем виде любая гидропневматическая установка состоит из герметичного водяного бака, насосного агрегата, каких-либо устройств пополнения запаса воздуха (компрессор или струйный регулятор воздуха), воздушного бака, комплекта приборов автоматического управления. В типовых гидропневматических установках запас воздуха, если наблюдается его потеря, периодически пополняется – в соответствии с количеством теряемого воздуха [1].

Принцип работы установок заключается в следующем: вначале в водяной бак подается сжатый воздух (или запасается в воздушном баке) под большим давлением по сравнению с рабочим. В процессе водоразбора в водопроводной сети давление в водяном баке будет снижаться. В момент, когда давление снизится до допустимого минимума, с помощью реле давления и шкафа автоматического управления включается насосный агрегат, который начинает подавать воду в бак. Во время подачи воды давление в баке будет возрастать до прежних пределов. При достижении максимального значения давления насосный агрегат также автоматически отключается. Таким образом, гидропневматическая установка работает циклически с промежутками между включениями насосов тем большими, чем меньше водопотребление в водопроводной сети. Основным элементом комплекта гидропневматической установки являются водовоздушный бак и насос, определяющие режим работы установки. Гидропневматические установки должны быть оборудованы подающей, отводящей и спускной трубами, а также предохранительными клапанами, манометром, датчиками уровня воды и устройствами для пополнения и регулирования запаса воздуха. Объем гидропневматического бака и параметры других элементов автоматики в основном зависят от производительности установленного насосного агрегата, что определяет режим работы установки в целом и

дает возможность независимо от многообразия типов насосов нормализовать подобные установки.

Опыт эксплуатации гидропневматических установок в системах водоснабжения объектов из подземных источников показывает, что, несмотря на стабильную и удовлетворительную работу установок в техническом плане, качество подаваемой воды в систему водопровода не соответствует нормам. Наблюдения за работой типовых установок показали, что в гидропневматическом баке со временем образуется осадок. Он свидетельствует о том, что растворенные в воде железо (Fe^{2+}) и марганец (Mn^{2+}) в баке частично окисляются кислородом, содержащимся в воздушной подушке бака, и в процессе гидролиза выпадают в осадок. Следует отметить, что степень окисления растворенного железа и марганца зависит от частоты подкачки воздуха в гидропневмобак, однако во всех случаях ограниченный объем воздушной подушки и недостаточная степень обогащения ее атмосферным кислородом не позволяют достичь полного окисления растворенных в воде железа и марганца. Поэтому практически всегда вода поступает в систему водопровода объекта для хозяйственно-питьевых нужд ненадлежащего качества. Чтобы решить эту проблему, для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения из подземных источников автономных объектов были разработаны варианты решения технологической схемы комплекса очистки воды на базе гидропневматической установки переменного давления (рисунок 1).

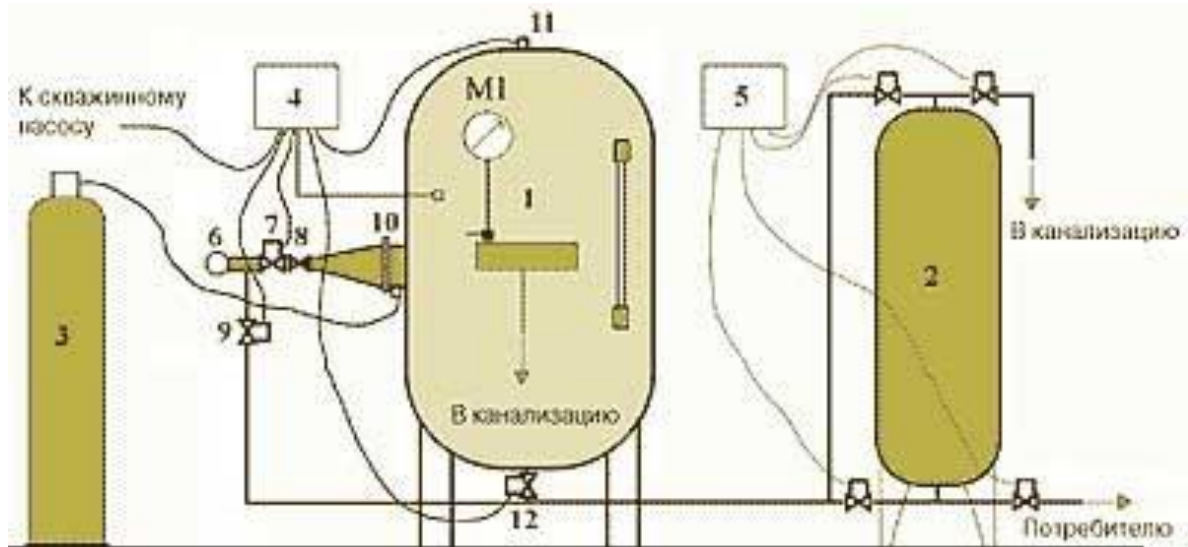


Рис. 1. Гидропневматическая установка в комплексе с системой очистки воды:
 1 – гидропневмобак; 2 – фильтр очистки воды; 3 – кислородный баллон с редуктором;
 4 – щит автоматического управления гидропневмобаком с реле давления и клапаном
 стравливания воздуха; 5 – щит автоматического управления работой фильтра;
 6 – подвод воды из скважины; 7, 9, 12 – отсекающие задвижки; 8 – обратный клапан;
 10 – эжекторный узел ввода воды с воздушным клапаном; 11 – стравливающий клапан;
 М1 – манометр с трехходовым краном

1 вариант

Свежий воздух докачивается циклически в гидропневмобак компрессором, когда давление в нем падает до критического значения, несколько превышающего минимальное давление, при котором происходит включение скважинного насоса. При этом в баке имеется достаточный запас воды для обеспечения потребителя. Компрессор включается в работу автоматически системой (4). Одновременно система автоматики (4) открывает калиброванный клапан, через который происходит стравливание воздуха из бака, а компрессор в это время докачивает в бак свежий воздух, обогащенный кислородом. При достижении минимального давления в баке происходит включение скважинного насоса, а система автоматики закрывает стравливающий клапан и выключает компрессор. Подача воды из скважины в гидропневмобак (1) осуществляется через перфорированный трубопровод. Разбрызгивание подаваемой из скважины воды происходит в воздушной подушке, за счет чего достигается необходимая аэрация воды и обогащение ее кислородом, необходимым для окисления растворенных форм железа и марганца.

Под избыточным давлением внутри гидропневмобака вода подается на фильтр (2) обезжелезивания воды, работой которого управляет система автоматики (5). В режиме нормального фильтрования вода из бака подается на фильтр сверху и отводится потребителю снизу. В режиме промывки фильтрующего материала вода подается снизу, обеспечивая взрыхление материала и его отмывку от нерастворимых соединений железа и марганца.

2 вариант

Гидропневмобак оборудуется эжекторным узлом ввода воды из скважины, поэтому в данном варианте отпадает необходимость установки компрессора для закачки свежего воздуха. Эжектор снабжен воздушным клапаном, через который осуществляется эжекция свежего воздуха в момент подачи воды в бак. При работе эжекторного узла система (4) включает на определенное время в работу стравливающий клапан для сброса обедненного кислородом воздуха воздушной подушки. Эжектор играет одновременно и роль смесителя подаваемой в бак воды и эжектируемого воздуха, что приводит к насыщению воды кислородом.

Через определенное время система (4) закрывает стравливающий клапан, и дальше работает так же, как в 1-м варианте.

3 вариант

Помимо гидропневмобака (1) с системой автоматического управления (4), насосным агрегатом скважины от реле давления и набором необходимых элементов для наблюдения и эксплуатации бака, напорного фильтра (2) очистки подземной воды с системой (5) автоматического управления его работой, комплекс оборудуется баллоном с чистым кислородом, снабженным редуктором давления, который подключен к

эжекторному узлу (8) ввода воды в гидропневмобак. Комплекс целесообразно применять при повышенных концентрациях железа (до 15 мг/л) и марганца (до 0,5 мг/л), когда кислорода атмосферного воздуха, вводимого по технологии 1-го и 2-го вариантов, недостаточно для окисления их растворенных форм. Система аналогична 2-му варианту, но с той лишь разницей, что к воздушному клапану эжектора присоединена линия от баллона (3) с чистым кислородом. При работе скважинного насоса в воду эжектируется кислород, стравливаемый через редуктор из баллона. Опыт работы аналогичной гидропневматической установки в системе водоснабжения индивидуального жилого дома с водопотреблением до 5 м³/сут и при содержании железа и марганца 8 мг/л и 0,3 мг/л соответственно показал, что запаса кислорода одного баллона хватает на 6–8 месяцев при нормальной культуре эксплуатации и обслуживания водоочистного комплекса.

4 вариант

Когда по каким-либо причинам отсутствует возможность установки компрессора или эжекторного узла для подкачки воздуха или кислорода из баллона в гидропневмобак, систему можно выстроить в двух вариантах:

4а. Воздушный клапан устанавливается непосредственно на корпусе гидропневмобака и к нему присоединяется линия от баллона с кислородом. Редуктор баллона регулируется таким образом, что воздушный клапан срабатывает под действием выходного давления баллона кислорода, когда давление внутри гидропневмобака несколько превышает минимальное давление, при котором происходит включение скважинного насоса, при этом в баке имеется достаточный запас воды для обеспечения потребителя. Кислород из баллона стравливается в гидропневмобак, одновременно система автоматики (4) открывает на определенное время клапан стравливания воздуха из бака и таким образом воздушная подушка обогащается кислородом, необходимым для процесса окисления. При достижении минимального давления в баке, на которое отрегулировано реле давления системы (4) происходит включение скважинного насоса и закрывается стравливающий клапан. Когда давление внутри бака превышает выходное давление редуктора баллона (3), воздушный клапан запирается и поступление кислорода из баллона в гидропневмобак прекращается. Далее комплекс работает так же, как и в других вариантах.

4б. Систему целесообразно использовать на неглубоких скважинах (до 25 м) и при небольшом диаметре водоподающей трубы (до 40 мм), когда отсутствует возможность установки компрессора или эжекторного узла. Согласно этому варианту, воздушный клапан устанавливается на трубопроводе за обратным клапаном от гидропневмобака. К клапану присоединяется линия от баллона с кислородом. Когда работает скважинный насос, воздушный клапан заперт давлением воды. При достижении максимального давления в баке скважинный насос отключается, обратный клапан (8) запирается, а вода, находящаяся в

подающей трубе (6), «скатывается» в скважину. Воздушный клапан открывается выходным (отрегулированным) давлением баллона с кислородом и в свободный объем водоподъемной трубы стравливается кислород из баллона. В момент очередного включения скважинного насоса воздушный клапан запирается, а богатая кислородом воздушная смесь вытесняется в гидропневмобак, обогащая его воздушную подушку кислородом, который затем используется для окисления железа и марганца в воде, поступающей в бак. Далее комплекс работает аналогично предыдущим вариантам. Следует отметить, что данный вариант не является экономичным в отношении расходования кислорода, т. к. при небольшом водоразборе или при его отсутствии «стравленный» в водоподающую трубу кислород «не работает» и может способствовать коррозии трубопровода. В данном случае желательно использование трубопроводов из коррозионно-стойких материалов.

В отличие от традиционных систем водоснабжения со станциями обезжелезивания воды, предлагаемая система очистки подземных вод на базе гидропневматических установок может непосредственно запитываться водой от водозаборных скважин, работа которых автоматизируется. При этом реализуемая технология обезжелезивания-деманганации воды обеспечивает надлежащую очистку подземных вод до требуемых норм питьевого стандарта [4]. Разработанная система позволяет обеспечивать автоматическую работу водоочистного комплекса в условиях неравномерности водоразбора в системе водоснабжения отдельно стоящих объектов.

Литература

1. Кедров, В. С. Санитарно-техническое оборудование зданий / В. С. Кедров, Е. Н. Ловцов. – М.: Стройиздат, 1989. – 146 с.
2. ГОСТ 2761-84. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. – Переизд. март 1994 с изм. № 1. – Взамен ГОСТ 17.1.3.03-77 ; Введ. 01.01.86. – М. : ГУП ЦПП, [б.г.]. – 16 с.
3. Дзюбо, В. В. К вопросу об использовании подземных вод Сибирского региона для питьевого водоснабжения/ В. В. Дзюбо // Питьевая вода. – 2004. – № 5. – С. 25-34.
4. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества : утв. 26.09.01. – Екатеринбург : ИД "Урал Юр Издат", 2008. – 96 с. – (Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы).
5. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : СНиП 2.04.02-84* : изм. № 1, утв. от 30.04.86 : утв. Госстроем СССР 27. 07.84 : взамен СНиП II-31-74 : введ. в д. 01.01.85 / Госстрой России. – Изд. офиц. – М. : ФГУП ЦПП, 2007. – 128 с.

Разработка комплексных энергосберегающих технологий в промышленной котельной

Энергосбережение – это направленный комплекс мер, основной целью которого является сокращение объема энергии, потребляемой от внешних источников. А это, в свою очередь, приводит к более рациональному потреблению энергии, причем на всех этапах ее преобразования и использования – от природных энергоресурсов до конечного потребителя.

Особой актуальностью отличается применение современных инновационных технологий энергосбережения, которые в настоящее время являются одним из наиболее эффективных способов рационализации использования энергии.

В последнее время в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве все более осознается целесообразность комбинированного производства электрической и тепловой энергии на паровых мини-теплоэлектростанциях (мини-ТЭЦ), располагаемых в непосредственной близости от потребителя. Это связано с постоянным удорожанием электроэнергии, учащением случаев возникновения аномальных шквальных ветров и заморозков, приводящих к снижению надежности линий электропередачи (обрыву проводов) централизованного электроснабжения.

В связи с этим главной целью работы являлось повышение надежности и эффективности получения комбинированной тепловой и электрической энергии.

В настоящее время нашли широкое применение в зарубежной и отечественной теплоэнергетике следующие установки: паровые турбины, (конденсационные паровые турбины, паровые турбины с противодавлением), газотурбинные установки с водяной или паровой утилизацией тепловой энергии, газопоршневые, газодизельные и дизельные агрегаты с утилизацией тепловой энергии различных систем этих агрегатов.

Рассмотрев все достоинства и недостатки существующих видов, для установки в промышленной котельной была выбрана паровая турбоустановка. Сравнив и проанализировав два вида паровых турбин, выбор был сделан в пользу противодавленческой установки. Конденсационная установка имеет главный недостаток – бесполезная отдача в пруд-охладитель большого количества теплоты.

Турбина с противодавлением представляет собой машину, весь отработанный пар которой при давлении, превышающем атмосферное,

поступает в нагревательные устройства, где его теплота используется для производственных или бытовых целей.

Для того, чтобы паровую противодавленческую турбину эффективно использовать уже в существующей котельной, переводя ее в режим мини-ТЭЦ, необходимо турбину установить параллельно редукционному устройству (рис.1).

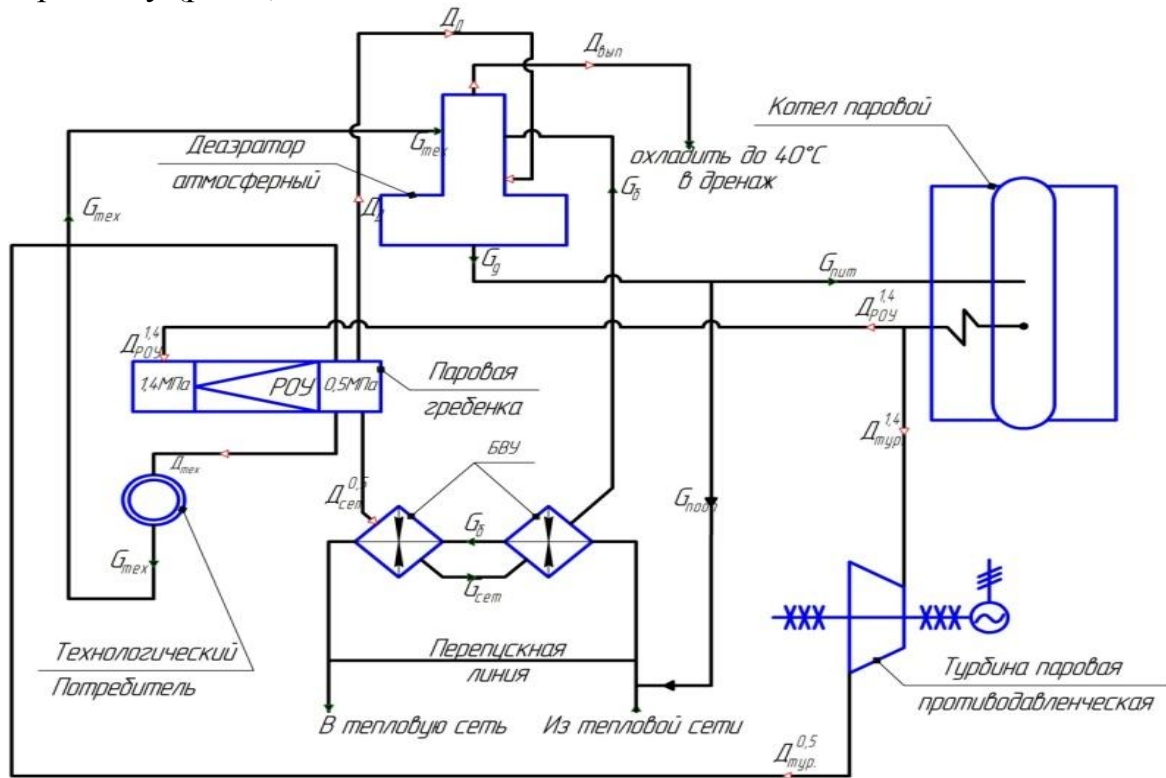


Рис. 1. Принципиальная схема мини-ТЭЦ с противодавленческой турбиной

Паровой котел вырабатывает перегретый пар, который поступает на лопасти паровой турбины с противодавлением. Потребитель использует пар давлением 0,5МПа. В случае выхода из строя турбины или при необходимости ограничить расход пара в турбине предусмотрена обводная линия, соединяющая клапан отбора пара из котла с РОУ.

Пар, идущий на технологический процесс или отопление, направляется через турбину, а работа, совершаемая в ней паром, используется для привода электрического генератора. Такой способ применения позволяет значительно снизить затраты электроэнергии на привод устройств и повысить КПД использования пара.

К установке в промышленной котельной применена паровая противодавленческая турбина без промежуточного отбора пара Р-0,15-1,3/0,5, включенная в тепловой схеме параллельно редукционной охладительной установки (РОУ) и выполняющая функцию РОУ, что позволяет вырабатывать электроэнергию, идущую на нужды котельной и промышленного предприятия, и повышать коэффициент использования топлива котельной установкой.

Характеристики турбоагрегата: номинальная мощность – 0,15 МВт; давление пара на входе в турбину – 1,4 Мпа; температура пара на входе в турбину – 250 °С; давление пара на выходе из турбины – 0,5 Мпа.

В состав оборудования паровой турбины входят: турбина паровая, генератор, рама, соединительная муфта, шкаф управления и автоматики, шкаф присоединений, запасные части и принадлежности, техническая документация, компьютерный пульт управления. Выполнена корректировка существующей тепловой схемы котельной. Отработанный пар от турбины поступает на теплообменники, тем самым снижается расход пара на нужды подогрева сетевой воды.

Наиболее эффективной с позиции энергосбережения следует считать технологию комбинированного производства энергии и теплоты с использованием противодавленческих паровых турбин. Высокий ресурс и продолжительный срок эксплуатации паровых турбин обеспечивается только при надлежащем качестве водяного пара, используемого в качестве энергоносителя. Поэтому целесообразно оснащать паровые котлы мини-ТЭЦ пароперегревателями.

Установка паровой турбины в котельной предусмотрена в отдельном пристроенном к зданию котельной помещении, что в первую очередь позволяет обеспечить защиту от шума расстоянием. В нем на нулевой отметке располагается турбогенератор и электрощитовая.

Перегретый пар поступает в турбину по паропроводу от ближнего котла. Отработанный мятый пар подается на выходную паровую гребенку РОУ, где смешивается с дросселированным в РОУ паром и далее используется в соответствии с технологией.

При остановке турбины перегретый пар из котла поступает на входную паровую гребенку перед РОУ, после чего также дросселируется и используется без ущерба для технологии.

Таким образом, использование противодавленческой турбины в составе турбоустановок позволяет получить собственную электроэнергию, себестоимость которой почти в 2 раза ниже, чем действительные тарифы центрального электроснабжения.

Литература

1. Лосев, С.М. Паровые турбины и конденсационные устройства: теория, конструкции и эксплуатация / С.М. Лосев. – М. – Л.: «Энергия». – 1964. – 376 с.
2. Семиң, А. Особенности современных когенерационных систем / А.Семиң // С.О.К. – 2012. – № 10. – С. 48-49.
3. Оптима технология // [Электронный ресурс]. – URL:<http://o-tech.com.ua/production/4> (дата обращения 20.12.2012).
4. Ютрон. Паровые турбины // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbopar.ru> (дата обращения 20.12.2012).

Определение длины береговой линии водохранилищ с использованием метода фракталов

С увеличением масштаба карты, по которой ведут измерение, длина береговой линии увеличивается.

В связи с задачей об определении длины береговой линии появилось понятие фрактала.

Фракталы – это геометрические объекты (линии, поверхности, пространственные тела), имеющие сильно изрезанную форму в одинаковой степени, в любом масштабе. Форма этих объектов не изменяется от того, рассматривается вблизи или издалека. Слово «фрактал» произошло от латинского «fractus» и переводится как дробный, ломаный, состоящий из элементов.

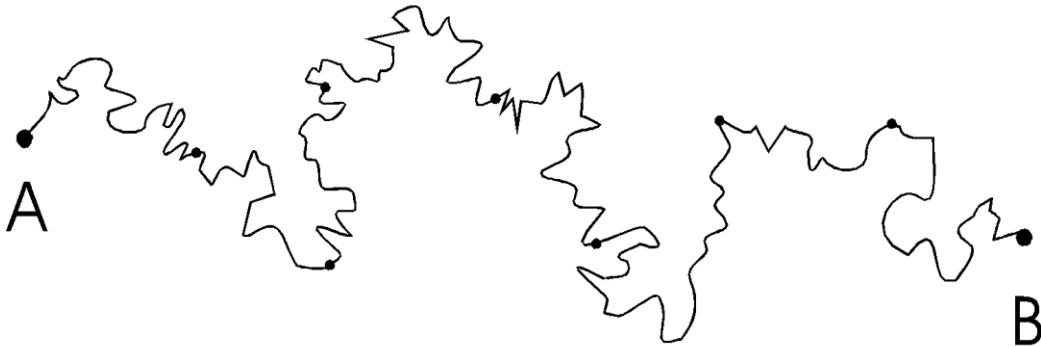


Рис. 1. Схема береговой линии

Для определения длины береговой линии с использованием ее фрактальных свойств, вводится понятие фрактальной размерности (D).

Фрактальная размерность (D) – обычная Евклидова размерность пространства, в котором находится фрактальный объект ($D = 1$ – линия, $D=2$ – плоскость, $D = 3$ – обычное трехмерное пространство). Измерим теперь участок береговой линии AB отрезками длиной l . Предположим, что нам потребовалось для этого не менее чем $N(l)$ шагов. Тогда, если при достаточно малых l величина $N(l)$ меняется с l по степенному закону

$$N(l) \sim \frac{1}{l^D}.$$

Эту формулу можно переписать также в виде

$$D = -\lim_{l \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln l}.$$

Это и служит общим определением фрактальной размерности D . В соответствии с ним величина D является локальной характеристикой данного объекта.

Для отрезка прямой линии длиной L минимальное число $N(l)$ одномерных отрезков размера l , с помощью которых можно покрыть данный отрезок целиком, равно. Значит, $D = 1$.

Для определения фрактальной размерности участка береговой линии AB необходимо измерить этот участок отрезками длиной l , и для этого потребуется $N(l)$ таких отрезков, а затем этот же участок надо измерить отрезками длиной $l' = 2l$ и для этого потребуется $N(l')$ таких отрезков. Тогда величина фрактальной размерности D может быть вычислена по формуле

$$D = - \frac{\ln\left(\frac{N(l)}{N(l')}\right)}{\ln\left(\frac{l}{l'}\right)} .$$

Эту формулу можно переписать в виде

$$\frac{N(l)}{N(l')} = \left(\frac{l'}{l}\right)^D .$$

Так же определить фрактальную размерность можно, построив логарифмический график зависимости N от l и тогда $D = \tan\alpha$, где α – угол между осью абсцисс и построенной прямой (рис. 2).

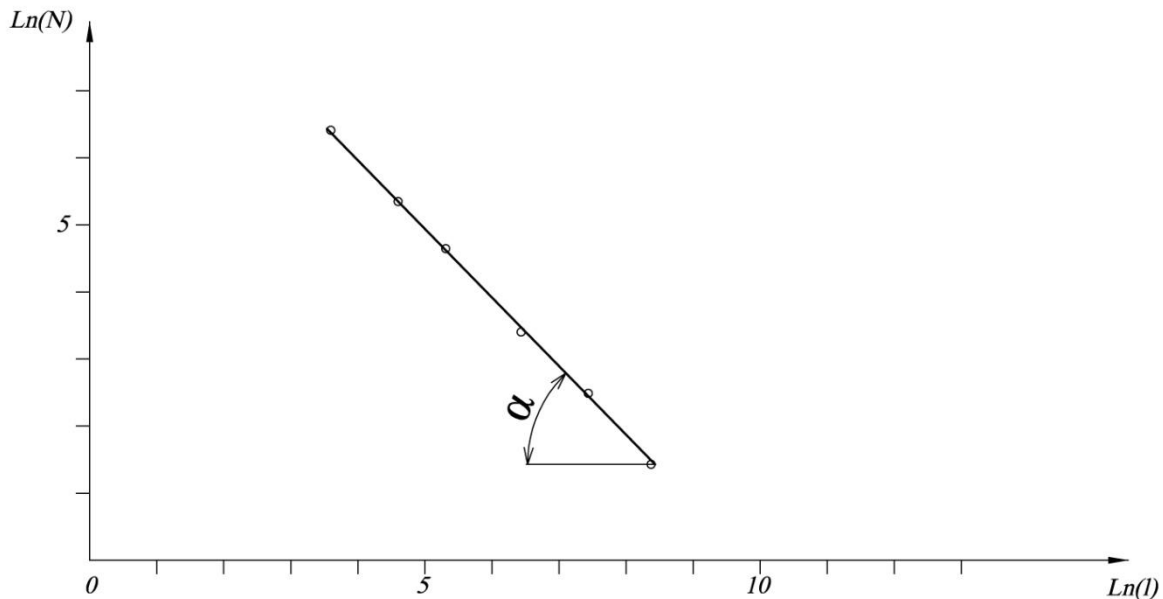


Рис. 2. Логарифмический график зависимости N от l

В результате с уменьшением масштаба длина береговой линии неограниченно возрастает.

Определим длину береговой линии Иваньковского водохранилища по карте масштаба 1:200000 и, используя фрактальные свойства этой линии, определим, какой была бы длина береговой линии, если бы измерения производились по карте масштаба 1:2000. Схема Иваньковского водохранилища показана на рисунке 3.

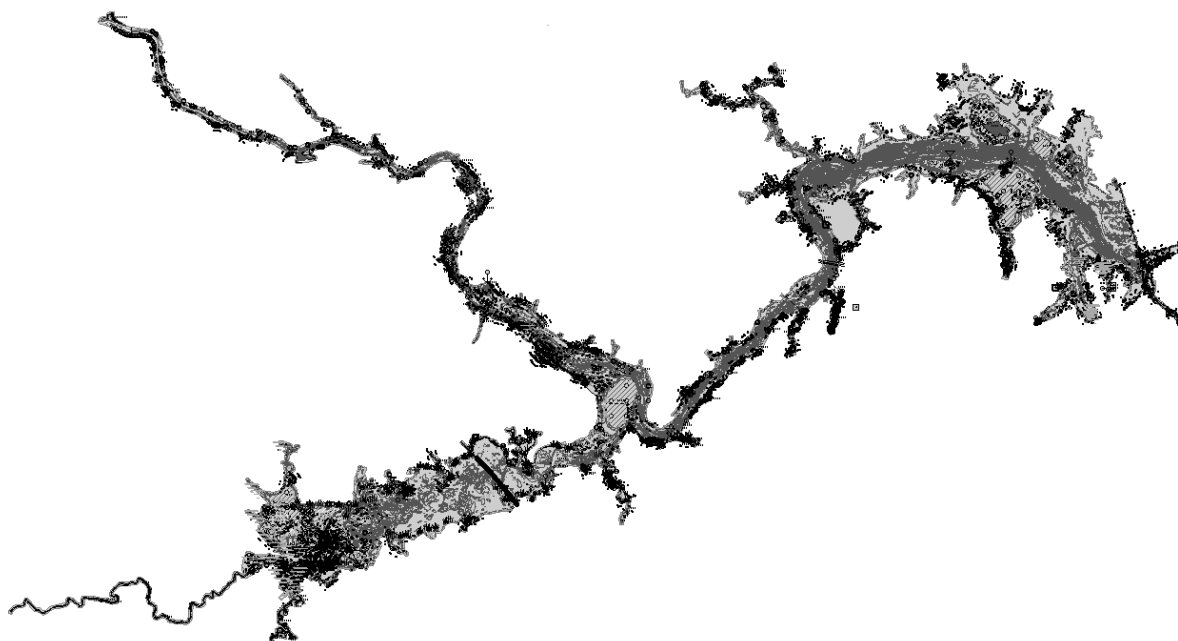


Рис. 3. Схема Иваньковского водохранилища

Для этого использованы следующие картографические материалы:
Карта 1:200000;
Карта 1:2000.

Результаты определения длины участка береговой линии представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результат обработки картографических материалов

Картографический материал	Длина береговой линии (по измерению) км	Длина береговой линии (по расчету) км
Карта 1:200000	862,5	
Карта 1:2000	938,5	925,7

Если взять за 100% длину рассмотренного участка береговой линии, определенному по наименьшему масштабу (1:2000), то при переходе к масштабу 1:200000 расхождение получается 8%. Погрешность вычисления длины береговой линии с использованием фрактальных свойств составила 1,5%.

На примере Иваньковского водохранилища была доказана целесообразность применения фрактального метода расчета.

Литература

1. Федер, Е. Фракталы: Пер. с англ./ Е.Федер – М.: Мир, 1991. – 254 с.
2. Водохранилища Верхней Волги / Авторский коллектив: руководитель В.С. Дементьев, – Н. Новгород: ВВБВУ, 2008. – 156 с.

Оценка негативного влияния изменения конструктивных элементов систем вентиляции гражданских зданий в режиме эксплуатации

В настоящее время действующей нормативной документацией в строительстве к системам обеспечения микроклимата многоквартирных жилых домов (МЖД) предъявляются повышенные требования по поддержанию расчетного (требуемого) температурно-влажностного режима жилых помещений. Однако, на фоне применения современных технических и технологических решений конструктивного исполнения систем отопления и теплоснабжения, повсеместно наблюдается «формальный» подход к проектированию систем вентиляции, заключающийся в использовании «традиционных» (типовых) схем. Эти решения, как правило, включают в себя вертикальные стояки вытяжных естественных (гравитационного типа) вентиляционных систем и приток воздуха в помещения через форточки и неплотности ограждающих конструкций, и не учитывают следующие нерасчетные факторы, возникающие в режиме эксплуатации МЖД:

1. Установка пристенных местных вентиляционных отсосов (МВО) над варочной поверхностью кухонных плит с механическим побуждением движения удаляемого воздуха через существующие вытяжные каналы систем естественной вентиляции.

2. Установка бытовых осевых вытяжных вентиляторов в санузлах и ванных комнатах с врезкой в существующие вытяжные каналы систем естественной вентиляции.

3. Замена в процессе ремонта и эксплуатации жилых помещений МДЖ проектных регулируемых вытяжных решеток на штампованные нерегулируемые в лучшем эстетическом исполнении.

Рассмотрим влияние каждого из основных вышеперечисленных факторов на обеспечение требуемых параметров микроклимата в жилых помещениях МДЖ.

При эксплуатации кухонного оборудования (бытовых газовых и электрических плит), повсеместно встречается явление несанкционированного монтажа МВО в существующие вытяжные каналы кухонь, предназначенные для круглогодичного непрерывного удаления воздуха в объеме, указанном в табл. 9.1 СП [2].

Проведенный анализ представленных на рынке РФ МВО (были рассмотрены заводы-изготовители Gorenje (Словения), Ardo (Италия), Bosch (Германия) и др.) позволил классифицировать их на встроенные (производительностью 250...350 м³/ч и свободным напором 150...200 Па в режиме удаления, производительностью 150...200 м³/ч в режиме рециркуляции) и каминные (производительностью 450...750 м³/ч и

свободным напором 300...350 Па в режиме удаления, производительностью 400...600 м³/ч в режиме рециркуляции).

Как правило, вытяжной вентилятор, входящий в конструкцию МВО, имеет три основных режима работы, определяющих производительность вентилятора (ступенчатое регулирование количества удаляемого загрязненного воздуха); для очистки воздуха в МВО предусматриваются металлические фильтры-жироуловители, не требующие замены при соблюдении требований заводов-изготовителей по периодичности (цикличности) их очистки. В режиме рециркуляции воздух пропускается через специальный угольный фильтр, устанавливаемый как дополнительная опция к фильтру-жироуловителю. В конструкции МВО также предусматривается обратный клапан, препятствующий обратному движению воздуха из вентиляционного канала в помещение кухни.

Установка МВО в вытяжные каналы естественной вентиляции МЖД несет за собой ряд негативных факторов. Рассмотрим наиболее невыгодный случай установки МВО на нижнем этаже системы вытяжной вентиляции с общим вертикальным стояком на несколько этажей и ответвлениями в каждое помещение через этаж (рис. 1).

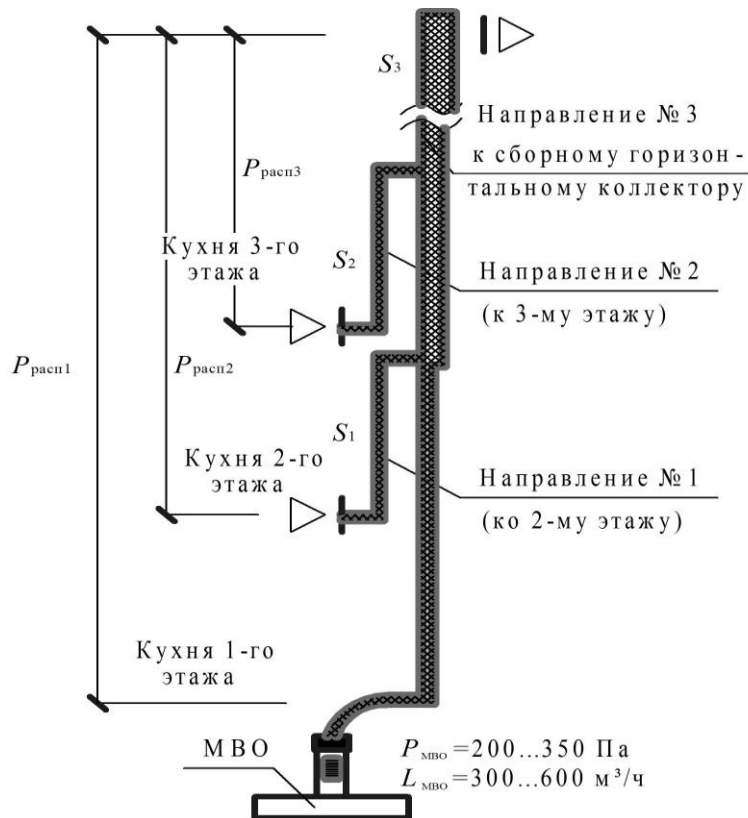


Рис. 1. Принципиальная схема несанкционированного присоединения МВО к существующей системе естественной вентиляции МЖД

При выполнении расчетов систем естественной вентиляции 9-этажного МЖД, величина располагаемого давления $P_{расп1}$ при расчетной наружной температуре воздуха $t_n = +5^\circ\text{C}$ на 1-м этаже ориентировочно составляет 15...20 Па (при скорости в сечении канала около 1 м/с);

учитывается, что потери давления в системе естественной вентиляции ΔP при $t_n = +5^\circ\text{C}$ должны быть незначительно меньше располагаемого давления. При включении МВО расходы воздуха будут направляться вверх по стояку таким образом, чтобы потери давления по всем направлениям удаления были равны. В данном случае располагаемыми давлениями на каждом рассматриваемом этаже $P_{\text{расп}1...3}$ пренебрегаем, система вентиляции при сдаче объекта в эксплуатацию должна быть отрегулирована таким образом, что данные давления должны быть уравнены потерями в вытяжном канале. Для ориентировочной оценки объема удаляемого воздуха по направлениям 1, 2, 3 (рис. 1), сравним характеристики вентиляционной сети S не всего вертикального вентиляционного канала в целом, а только его отдельных направлений.

Характеристика сети по каждому из направлений определяется по зависимости:

$$S_i = \Delta P / L_i^2, \text{ Па}/(\text{м}^3/\text{ч})^2, \quad (1)$$

где: ΔP_i – суммарные потери давления по рассматриваемому направлению, Па ;

L_i – расчетный расход воздуха по рассматриваемому направлению.

Обязательным является соблюдение постоянства величины общего расхода удаляемого воздуха и равенства потерь давления по всем направлениям. Следовательно:

$$S_1 L_1^2 = S_2 L_2^2 = S_3 L_3^2. \quad (2)$$

Ввиду того, что протяженность направления 3 значительно превышает протяженность направлений 1 и 2, характеристика сети S_3 направления 3 будет значительно больше, а направлений 1 и 2 примерно одинакова:

$$S_1 \approx S_2 \ll S_3 \quad (3)$$

При рассмотрении (2) и (3) следует, что:

$$L_1 \approx L_2 \gg L_3. \quad (4)$$

Получено по (4), что основная часть удаляемого воздуха будет попадать в ближайшие по высоте вентиляционного стояка помещения (эффект задувания). Следует заметить, что расход задуваемого в вышерасположенные помещения (кухни смежных по высоте квартир МДЖ) воздуха будет увеличиваться при расчетной температуре наружного воздуха выше принятой при расчетах вентиляции $t_n = +5^\circ\text{C}$ и снижаться при расчетной температуре наружного воздуха ниже $t_n = +5^\circ\text{C}$.

Основными негативными последствиями задувания удаляемого с нижних этажей отработанного воздуха с кухни, влияющими на здоровье людей и обеспечение расчетных параметров микроклимата, являются: изменение (нарушение) аэродинамических принципов работы естественной системы вентиляции; распространение запахов пищи и болезнетворных бактерий и микроорганизмов по вентиляционному стояку в соседние помещения смежных квартир; нерасчетные повышение

температуры внутреннего воздуха и нерасчетные значения относительной влажности воздуха в следующих по высоте вентиляционных стояках жилых помещениях.

Осуществить контроль силами надзорных органов фактов установки МВО с подключением в существующие вентиляционные каналы представляется достаточно сложной задачей. Также следует отметить, что наличие МВО над варочной поверхностью стало неотъемлемой частью современной кухни (технологии приготовления пищи). Основным выходом из сложившейся парадоксальной ситуации является конструктивное решение на стадии проектирования новых МЖД в виде организации дополнительного вытяжного канала, предназначенного исключительно для подключения МВО в помещениях кухонь жилых квартир. Обособленный вытяжной канал в данном случае должен представлять собой сборный коллектор с заглушенными отверстиями для перспективного подсоединения МВО собственниками помещений. Геометрические размеры канала должны определяться из условий расчета на одновременность действия МВО и наименьших потерь давления в рассматриваемом дополнительном канале; конструктивно должны накладываться определенные ограничения на максимальную и минимальную производительность МВО ($\text{м}^3/\text{ч}$), а также создаваемый им свободный напор (Па).

Установка бытовых осевых вентиляторов в существующие вентиляционные каналы имеет следующие негативные последствия:

- задувание смежных ответвлений вентиляционных каналов, на которых не установлены бытовые вентиляторы (как и в случаях несанкционированной установке МВО);

- распространение неприятных запахов и болезнетворных микроорганизмов по соседним этажам;

- увеличение количества удаляемого воздуха из помещений санузлов, и как следствие, образование нерасчетных потерь теплоты. Отличие требуемых расходов от фактически удаляемых вентиляторами связано с фактом повышенного значения номинальной производительности большинства бытовых вентиляторов по сравнению с требуемыми (расчетными) значениями количества удаляемого воздуха;

- отсутствие возможности проведения регулярного осмотра оборудования, поддержания одного расчетного режима работы бытового вентилятора (современные бытовые осевые вентиляторы имеют несколько режимов работы);

- полное отсутствие воздухообмена при отключении или поломке вентилятора, а также вследствие закрытия обратного клапана, входящего в конструкцию бытового вентилятора.

Замена собственниками жилых помещений проектных регулируемых решеток на штампованные нерегулируемые с лучшим эстетическим оформлением приводит к следующим негативным факторам: изменению

расхода удаляемого воздуха, зависящего от угла поворота жалюзей регулируемой вытяжной решетки; изменению температуры внутреннего воздуха в обслуживаемых помещениях квартир; образованию конденсата («точки росы») на внутренних поверхностях вентилируемых помещений.

Заключение. Совокупность рассмотренных последствий внесения несанкционированных изменений проектной документации по организации воздухообмена помещений МЖД позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Следует относиться к строительству, наладке, последующей эксплуатации, сервисному обслуживанию, периодическому ремонту гравитационных систем вентиляции с той же степенью ответственности, что и к системам вентиляции с механическим побуждением движения воздуха, для которых установлены регламенты на перечисленные циклы.

2. При строительстве современных жилых МЖД следует учитывать фактические эксплуатационные потребности населения: организация индивидуального вытяжного канала для подключения МВО; принудительное удаление воздуха из помещений посредством системы централизованной механической вентиляции [5].

3. Все конструктивные изменения систем вентиляции должны согласовываться со специализированной организацией, отвечающей за надлежащую эксплуатацию систем и поддержание требуемых параметров микроклимата в жилых помещениях и местах общего пользования.

Литература

1. СанПиН 2.1.2.1002-00. 2.1.2. Проектирование, строительство и эксплуатация жилых зданий, предприятий коммунально-бытового обслуживания, учреждений образования, культуры, отдыха, спорта. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Ред. от 21.08.2007.

2. СП 54.13330.2011. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция. СНиП 31-01-2003.

3. ГОСТ 3049496. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

4. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Часть 3. Кн. 1, 2 / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин и др.; под ред. Н.Н Павлова и Ю.И. Шиллера. – 4 изд, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992.

5. Малахов, М.А. Опыт проектирования естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками/ М.А.Малахов, А.Е. Савенков // АВОК. – 2008. – № 6. – С. 20-32.

Перспективы использования детандер-генераторных агрегатов

За последние 15-20 лет в большинстве промышленно развитых стран созданы и внедрены установки для преобразования энергии органического топлива в электрическую энергию и теплоту. Дальнейшее повышение технико-экономических показателей таких установок требует поиска новых, нетрадиционных методов, применение которых позволило бы существенно повысить технико-экономические показатели работы энергетического оборудования и одновременно улучшить его экологические показатели.

Одной из возможностей решения этой проблемы на промышленных предприятиях, использующих в качестве топлива природный газ, является применение детандер-генераторных агрегатов (ДГА). Существуют различные типы ДГА.

Сейчас на основе детандер-генераторных агрегатов разработаны два типа бестопливных установок. Первая модель состоит из ДГА и традиционного теплового насоса (ТН), в котором рабочим телом являются хладагенты – вещества, имеющие низкую температуру кипения. Вторая модель работает на так называемом воздушном тепловом насосе (ВТН), в котором рабочим телом является обычный атмосферный воздух. У каждого из вариантов установок есть ряд преимуществ и недостатков. Однако обе эти модели установок по своей сути бестопливны, то есть их работа происходит без сжигания топлива.

В настоящее время турбодетандеры оцениваются специалистами как один из перспективных видов турбинной продукции с большим рынком сбыта. Причем рынком наиболее востребован мощностной ряд 1,5-6МВт [1].

Следует отметить и инвестиционную привлекательность этого сегмента рынка. По разным оценкам, ресурс внедрения ДГ-технологии в России и СНГ оценивается в 5000–8000 МВт. А это – нагрузка энергомашиностроительных предприятий на многие годы. Срок окупаемости проектов – от 3 до 5 лет. Для потребителей же это – производство относительно дешевой, экологически чистой электроэнергии на собственные нужды. Кроме того, это экономия газа, который можно отправить на экспорт.

В мировой практике накоплен значительный опыт успешной эксплуатации ДГА. В зарубежной научно-технической периодической литературе дается высокая оценка эффективности ДГА, которая определяется прежде всего меньшими удельными капитальными затратами и удельными расходами топлива на выработку электроэнергии, чем на паротурбинных энергоблоках.

В России также эксплуатируются ДГА. Первый промышленный детандер-генераторный агрегат был внедрен в 1995 году на одной из московских ТЭЦ, где установлены два агрегата единичной мощностью по 5000 кВт каждый. До полностью автоматизированного выхода турбины на режим холостого хода требуется 15 минут. Время выхода с режима холостого хода на режим с максимальной нагрузкой не превышает одного часа. Агрегаты не требуют большого количества обслуживающего и эксплуатационного персонала. Использование ДГА на электростанциях позволит получить около 1% дополнительной мощности, снизить расход топлива, улучшить экологические показатели.

В Нижегородской области находятся несколько ГРП и ТЭЦ, на которых также может применяться установка ДГА.

Детандер-генераторный агрегат представляет собой устройство, в котором энергия потока транспортируемого природного газа преобразуется сначала в механическую энергию в детандере, а затем в электрическую энергию в генераторе. Существует также принципиальная возможность получения одновременно с электроэнергией теплоты различных температурных уровней (высокотемпературной для обогрева и низкотемпературной для создания холодильных установок и систем кондиционирования), образующейся при работе ДГА. Основными составными частями ДГА являются детандер, электрический генератор, теплообменники подогрева газа, регулирующая и запорная арматура, система КИП и автоматики.

ДГА используются в системе газоснабжения на станциях технологического понижения давления газа (на газораспределительных станциях – ГРС и газорегуляторных пунктах – ГРП). Обычно понижение давления газа на ГРС и ГРП осуществляется за счет дросселирования газового потока.

Температура газа на входе на ГРС и ГРП зависит от времени года и составляет в средней полосе от -10 до $+10^{\circ}\text{C}$. Если газ перед детандером не подогревать, то после расширения его температура может понизиться до $-80 \dots -100^{\circ}\text{C}$, что недопустимо по двум причинам. Во-первых, существуют температурные ограничения при эксплуатации газовых трубопроводов после ГРС и ГРП, запрещающие эксплуатировать эти трубопроводы при температуре ниже минус 30°C . Эта причина принципиально может быть устранена за счет простого конструктивного решения: установки подогревателя газа на выходе из детандера непосредственно за последней ступенью. Во-вторых, согласно требованиям ГОСТ 5542-87 [2], температура газа на выходе со станции понижения давления должна быть выше точки росы для данного газа. Точка росы зависит от влажности, давления и температуры транспортируемого газа и находится в пределах от -7 до -12°C . При низких температурах в газе могут образовываться кристаллогидраты. Гидраты могут образовываться как в жидкой, так и в

твердой фазах, что при неблагоприятных условиях может привести к нарушению нормального режима работы детандера.

Работа ДГА на ГРС

Для подогрева газа в ДГА, работающих на газораспределительных станциях, обычно используются теплообменники, греющей средой в которых является вода, нагретая в котлах, сжигающих органическое топливо.

Если на ГРС внедрить двухступенчатую ГРТ, включенную в газораспределительную систему параллельно дроссельному устройству, газ в первой ступени ГРТ расширится от начального давления 4,0...4,3 МПа до промежуточного давления ~1,46 МПа, а во второй - до конечного давления 0,48...0,52 МПа (в зависимости от времени года). Газ перед первой ступенью расширения нагревается до 63°C, а перед второй – до 61°C водой, которая поступает из котельной установки. Количество производимой электроэнергии составляет около 70% от количества тепла, затрачиваемого на нагрев газа, что почти вдвое выше эффективности тепловых электростанций.

Работа ДГА на ГРП

При транспортировке газа от ГРС до ГРП, расстояние между которыми составляет обычно до нескольких десятков километров, энтальпия газа может значительно изменяться (что обычно и происходит) вследствие теплообмена с окружающей средой. Длина же газопроводов от ГРП до потребителей газа обычно невелика (несколько сотен метров). Энтальпия газа при его транспортировке от ГРП до газоиспользующего оборудования изменяется мало. При установке ДГА на ГРП транспортируемый на небольшие расстояния газ не успевает нагреваться в трубопроводе при теплообмене с окружающей средой, а без организации подогрева газа после детандера физическая теплота топлива, вносимого в топку, окажется меньше, чем при дросселировании. Энергия, необходимая для повышения энтальпии газа до первоначального состояния, может быть получена либо при сжигании дополнительного топлива в топке газоиспользующего оборудования или специально для этого предназначенного котла, либо в теплообменнике без каких-либо дополнительных устройств при использовании низкопотенциальной энергии (окружающей среды или вторичных энергетических ресурсов). Таким образом, при определении энергетической эффективности применения ДГА нельзя рассматривать его лишь в качестве отдельного агрегата для производства электроэнергии, а необходимо учитывать как изменение энтальпии газа после детандера, так и влияние этого изменения на показатели работы газоиспользующего оборудования по сравнению с существующим традиционным дросселированием.

При подогреве газа перед ДГА, расположенном на пристанционном ГРП, могут использоваться пар отборов, питательная вода, сетевая вода и уходящие газы котлов или газовых турбин.

Работа ДГА на ТЭЦ.

Проводилось множество испытаний по определению эффективности включения ДГА в тепловую схему ТЭЦ с турбинами с промежуточным перегревом и без него [3]. Методика основана на сравнении КПД ТЭЦ по производству электроэнергии без ДГА и при его включении. Проведенные по этой методике расчеты показали, что включение ДГА в тепловую схему ТЭЦ приводит к повышению тепловой экономичности электростанции. При этом повышение тепловой экономичности тем выше, чем ниже тепловая нагрузка ТЭЦ.

Подогрев газа перед детандером паром отбора турбины оказывает большее положительное влияние на тепловую экономичность ТЭЦ при использовании ДГА, чем подогрев газа теплотой автономного котла, при КПД по выработке электроэнергии меньше 0,88.

При работе ТЭЦ по тепловому графику использование ДГА позволяет уменьшить удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии для всей ТЭЦ на 0,1...0,3% исходного. При работе оборудования в конденсационном режиме уменьшение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии может составить 1,0... 1,2% [4].

Используя схемы с пневмоэлектрогенераторными агрегатами (ПЭГА) при проходе газ объемом 10 тыс. м³/ч и снижении его давления в турбине в 2 раза вырабатывается 100 кВт•ч электроэнергии и практически столько же «холода» [5]. При выработке 100 кВт•ч электроэнергии на ТЭЦ расходуется до 0,05 т. у. т. (с учетом потерь в сетях и т. д.). При производстве 100 кВт•ч «холода» традиционным способом расходуется до 150 кВт•ч электроэнергии. При этом на ТЭЦ также расходуется до 0,075 т. у. т.

Утилизация потенциальной энергии потока газа объемом 10 тыс. м³/ч экологически чистым способом с помощью ПЭГА позволяет выработать 200 кВт•ч энергии (100 кВт•ч электроэнергии и 100 кВт•ч «холода») и этим обеспечить экономию более 0,125 т. у. т. в час.

Если КПД тепловых турбинных установок не превышает 40%, самых лучших парогазовых установок (газотурбинные двигатели в сочетании с паровой турбиной) – 50, то КПД детандер-генераторного агрегата достигает 75%, а себестоимость вырабатываемой им электроэнергии существенно ниже, чем на тепловых станциях.

Чтобы получить киловатт-час от детандер-генератора, на подогрев газа тратится примерно 70 г условного топлива, в то время как для выработки такого же количества электроэнергии на ТЭЦ сжигается до 300 г. Но тепло, используемое в детандере, отбирается у пара, который

предварительно уже поработал в паровой турбине, благодаря чему была произведена электроэнергия. Тем самым увеличивается КПД ТЭЦ.

Конечно же, детандер-генераторные агрегаты не могут составить конкуренции крупным электростанциям, но в пересчете на киловатт мощности они требуют гораздо (в 2-4 раза) меньших капитальных затрат — в зависимости от мощности ДГА примерно до 450 долларов, их можно достаточно быстро, за несколько месяцев, размещать на территориях уже действующих тепловых станций, окупаются они за 2,5-3 года, и они экологически чисты.

Существуют различные типы ДГА. Ставится задача проанализировать и выявить наиболее экономичные схемы их использования.

Литература

1. Мамедов, А. ДГА в России и в мире [Электронный ресурс] / А. Мамедов. – Режим доступа : www.energyland.info/analitic-show-65720.
2. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунального – бытового назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 4 с.
3. Влияние детандер – генераторных агрегатов на тепловую экономичность ТЭЦ / Э. К. Аракедян, В. В. Кудрявый, Ю. Л. Гуськов [и др.] // Электрические станции. – 1997. – Спец. выпуск – С. 77-82.
4. Опыт эксплуатации детандер – генераторных агрегата на ТЭЦ-21 Мосэнерго / Ю. Л. Гуськов, В. В. Малянов, Ю. Я. Давыдов, В. С. Агабабов // Электрические станции. – 2003. – № 12. – С. 15-17.
5. Аксенов, Д. Т. Выработка электроэнергии и «холода» без сжигания топлива [Электронный ресурс] / Д. Т. Аксенов. – Режим доступа: www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2088.

УДК 697.1

Е.С. Муравьева

Методические основы проведения энергоаудита высшего учебного заведения

В рамках исполнения требований Федерального закона 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1], проведение энергетического обследования является обязательным для зданий и сооружений, перечень которых регламентирован п. 1 статьи 16. Высшие учебные заведения, относящиеся по классификации данной статьи №261-ФЗ [1] к «организациям с участием государства или муниципального образования», подлежат обязательному

энергетическому обследованию (энергоаудиту), порядок проведения (последовательность) которого включает в себя следующие основные этапы:

1. подготовительный этап;
2. сбор информации об организации;
3. инструментальное обследование (в т.ч. тепловизионное) систем энергоресурсопотребления высшего учебного заведения (вуза);
4. обработка результатов обследования и их последующий анализ;
5. этап экспертизы (проверки) и регистрации разработанного энергетического паспорта.

На основании полученных непосредственно нами данных при проведении энергоаудита Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета в 2012 году, приводится методика описания каждого основного этапа выполнения работ.

1. Подготовительный этап заключается в подготовке уполномоченными лицами вуза технического задания для проведения энергетического обследования; назначения ответственного сотрудника вуза для обеспечения беспрепятственного доступа специалистов энергоаудитора к обследуемым объектам и отдельным инженерным системам и предоставления информации, требуемой для проведения энергетического обследования; передаче энергоаудиторам необходимой статистической, документальной, технической, технологической и иной документации, с указанием наименования каждого документа, формата, даты составления и сроков ее возврата;

2. Сбор документальной информации об организации (вузе). Уполномоченные ответственные лица вуза предоставляют энергоаудитору следующий перечень необходимой для проведения обследования документации:

- заполненный комплект опросных листов по форме, утвержденной саморегулирующей организацией (СРО), в которой состоит энергоаудитор;
- копии паспортов БТИ на объекты (здания, сооружения и прочие строения), находящиеся на балансе вуза;
- копии комплекта договоров с энергоресурсоснабжающими организациями за базовый год (последний полный календарный год перед датой проведения энергетического обследования);
- копии договоров с арендодателями и арендаторами помещений и отдельных зданий вуза;
- отчетную документацию по коммерческому учету потребляемых энергоресурсов за базовый год;
- полные бухгалтерские расчеты за потребление всех видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) за базовый год;
- ведомость основных средств вуза (бухгалтерская справка), представленная по состоянию на отчетный период (последние пять лет

перед проведением текущего энергетического обследования);

- штатное расписание вуза за базовый год, количество профессорско-преподавательского состава, вспомогательных сотрудников, аспирантов, студентов очной, заочной и иной формы обучения;

- копию устава вуза;

- дату начала и окончания отопительного сезона за базовый год;

- приказы на ответственных лиц за энергохозяйство и реализацию энергосберегающих мероприятий, документы на их обучение;

- отчетную документацию по ремонтным, наладочным и энергосберегающим мероприятиям за базовый год;

- отчетную документацию по энергосберегающим мероприятиям за базовый год;

- заводские паспорта с указанием наличия и даты последней поверки узлов учета энергии и ресурсов;

- паспорта на энерго- и водопотребляющее, технологическое и др. оборудование;

- сведения о наличии на балансе вуза парка автотранспорта, марки автомобилей или иной спецтехники, годе выпуска, нормативных показателях потребления горюче-смазочных материалов (ГСМ), а также фактические расходы ГСМ каждой единицей техники и количество отработанных машиносеменов за базовый период;

- сведения об утвержденных показателях энергоэффективности, содержащие информацию об удельных расходах каждого вида ТЭР;

- схемы внутренних и наружных сетей энерго- и водоснабжения;

- копии журналов учета времени работы энергетического оборудования за базовый год;

- энергетический паспорт и отчетную документацию по результатам предыдущего обследования.

3. Инструментальное обследование систем энергоснабжения и водопотребления. Инструментальное (метрологическое), в т.ч. термографическое (тепловизионное) обследование, проводится энергоаудитором для дополнения статистической, документальной и технической информации, необходимой для оценки эффективности энергоиспользования. Обязательным является проведение термографического обследования ограждающих конструкций и систем отопления.

В обязательном порядке проводят замеры: качества электрической энергии; освещенности; параметры микроклимата в помещениях; температуры, давлений и расходов систем теплоснабжения; фактического расхода природного газа или иного топлива при наличии собственной котельной на балансе вуза.

На этапе метрологического обследования энергоаудитором проводятся следующие мероприятия:

- определяется объем и регламент необходимого метрологического обследования;
- разрабатывается и согласовывается схема измерений, время и точное место проведения измерений;
- производится обработка результатов проведенных измерений;
- производится оформление результатов измерений для последующего их анализа (табличные формы, диаграммы и т.д.).

4. Этап обработки и анализа результатов обследования. После окончания комплекса метрологического обследования проводится обработка полученной в ходе инструментального обследования и собранной в ходе сбора документации информации, а также аналитический обзор по всем видам энергоресурсопотребления вуза; оценка эффективности использования энергоресурсов.

Данный этап включает в себя следующие, проводимые энергоаудитором, работы:

- определение фактических и расчет нормативных показателей энергоэффективности потребляемых вузом видов энергоресурсов и воды с последующим их сравнением, анализом несоответствия фактических показателей нормативным значениям;
- разработка организационных и технических мероприятий по устранению выявленных нерасчетных расходов энергоресурсов и реализации мероприятий с последующим выполнением комплекса расчетов их фактической экономии;
- определение капитальных затрат и экономии при реализации разработанных мероприятий по энергоресурсосбережению с дальнейшим выполнением расчетов экономической эффективности;
- разработка энергетического паспорта по установленной Приказом Министерства энергетики [2] форме; заполнение энергетического паспорта при помощи специализированного программного комплекса; оформление отчетной документации о проделанной работе.

Следует отдельно отметить, что при разработке конкретных энергосберегающих мероприятий основными этапами выполнения работ являются: определение принципиальной возможности получения экономии; проведение комплекса технико-экономических расчетов потенциальной годовой экономии в физическом и денежном выражении; определение состава инженерного оборудования, необходимого для реализации в рамках разрабатываемых мероприятий, его примерную капитальную стоимость; оценка общего экономического эффекта разрабатываемых мероприятий.

5. Этап согласований. После разработки энергетического паспорта на заключительном этапе проведения энергетического обследования энергоаудитор согласовывает энергетический паспорт в СРО. В случае выявления замечаний экспертом СРО, энергоаудитор в кратчайшие сроки

устраняет их с обязательным согласованием внесенных исправлений с уполномоченными лицами вуза.

Завершающим этапом обязательного энергетического обследования после утверждения энергетического паспорта руководителем вуза является регистрация энергетического паспорта специалистами СРО в Министерстве энергетики Российской Федерации с получением номера регистрации и даты внесения в государственный реестр энергетических паспортов.

Литература

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. Приказ Министерства энергетики РФ от 19 апреля 2010 г. №182 «Об утверждении требований к энергетическому паспорту, составленному по результатам обязательного энергетического обследования, и энергетическому паспорту, составленному на основании проектной документации, и правил направления копии энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования», с изм. и дополнениями от 8.12.2011.

УДК 532.5:621.694

С.А. Мустакимова

Использование ANSYS для исследования гидродинамики и теплообмена течения жидкости в пружинно-витом канале

С увеличением энергетических мощностей и объема производства актуальны вопросы, связанные со снижением размеров и массы теплообменного оборудования и повышения его эффективности.

Одним из направлений решения этих задач является создание высокоэффективных теплообменных элементов на основе пружинно-витых каналов [1-4], представляющих собой тугую пружину, витки которой жестко скреплены [5-7].

Однако внедрение в промышленность теплообменных аппаратов на базе пружинно-витых каналов сдерживается отсутствием надежных данных о гидродинамических и тепловых характеристиках и особенностях процессов, протекающих в проточной части этих каналов.

В связи с этим, на основе двухпараметрической модели Менстера [8], была разработана математическая модель краевой трехмерной сопряженной задачи теплообмена в условиях закрученного турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в пружинно-витом канале.

При этом нами в безразмерном виде, с применением оригинальных подстановок, были предложены основные уравнения гидродинамики и теплообмена в проточной части канала и наложены граничные условия.

Классическая схема исследований подразумевает численную реализацию математической модели, проведение натурального эксперимента и сравнительный анализ, в целях подтверждения адекватности математической модели реальному процессу.

Следует отметить, что при проведении натурального эксперимента не всегда представляется возможным проведение исследований полного объема параметров гидродинамики и теплообмена, ввиду сложности геометрии проточной части каналов и особенностей турбулентного течения среды.

Современные информационные технологии позволяют дополнить этот пробел и выполнить натурный эксперимент, включающий в себя графическую интерпретацию исследуемой геометрии каналов и численную реализацию гидродинамики и теплообмена в проточной части канала.

В этой связи нами, для подтверждения адекватности математической модели был проведен компьютерный эксперимент с применением современного пакета прикладных программ ANSYS.

На рис.1 представлена графическая интерпретация пружинно-витой трубы, на рис.2 – область течения жидкости в канале.

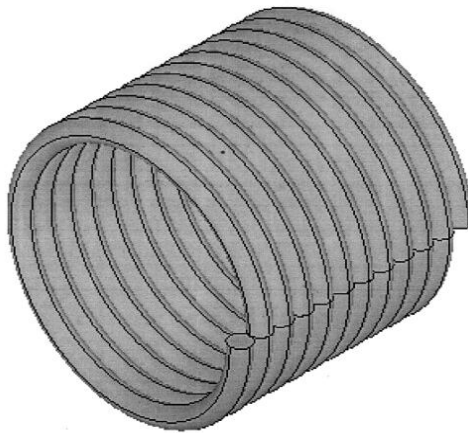


Рис.1. Пружинно-витой канал

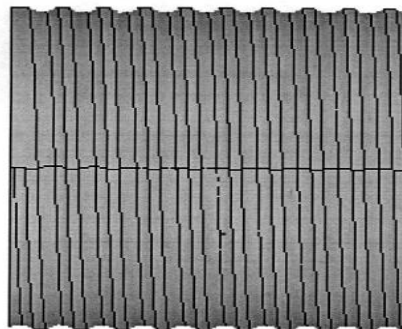


Рис.2. Область течения жидкости в пружинно-витом канале

Проточная часть канала представляет собой пространственную винтовую линию.

Задание граничных условий на входе в канал с учетом «мягких» условий Неймана, с наложением сетки из конечных элементов в виде тетраэдров (мелкой в области «канавок», более крупной – по объему), позволило определить параметры течения и подтвердить адекватность предложенной нами модели.

Литература

1. Патент РФ № 64750 на полезную модель. Теплообменный элемент/ Золотоносков А.Я., Золотоносков Я.Д. № 2007107173; заявл. 26.02.07; Бюл. 19. – С.3.

2. Евсеев, Е.С. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых труб/ Е.С.Евсеев, А.Я.Золотоносков, Я.Д. Золотоносков // Тр. Академэнерго. – 2008. - № 4. – С. 18-33.

3. Антонов, С.Ю. Определение коэффициента теплопередачи эллиптических пружинно-витых каналов в теплообменных аппаратах/ С.Ю.Антонов, А.В.Антонова, Я.Д.Золотоносков // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях: сб. тр. XVII шк.– семинара молодых ученых и специалистов. – Жуковский: ЦАГИ, 2009. – Т. 1. – С. 280-283.

4. Антонов, С.Ю. Математическая модель конфигурации эллиптических пружинно-витых каналов теплообменных устройств/ С.Ю. Антонов, А.В. Антонова, Я.Д. Золотоносков // Известия КГАСУ. – 2009. – № 2 (12).– С. 173-178.

5. Патент РФ № 62694 на полезную модель. Теплообменный элемент/ Золотоносков А.Я., Золотоносков Я.Д., Конахина И.А. № 2006143517/23, заявл. 07.19.06; Бюл. 12. – С. 7.

6. Патент РФ № 64750 на полезную модель. Теплообменный элемент / Золотоносков Я.Д., Осыка И.Н., Никулин В.А., Фомин Н.А. № 2011112666/06, заявл. 01.04.11; Бюл. 28. – С. 11.

7. Патент РФ №11382 на полезную модель. Теплообменный элемент / Золотоносков Я.Д., Мустакимова С.А., Осыка И.Н., Никулин В.А. № 2011127714/06, заявл. 06.07.11; Бюл. 6. – С. 5.

8. Богоутдинова, А.Г. Математическая модель сопряженной задачи теплообмена закрученного турбулентного течения жидкости в пружинно-витом канале на основе модели Менстера/ А.Г.Богоутдинова, Я.Д.Золотоносков, С.А. Мустакимова // Известия КГАСУ. – 2012. – № 2 (20) – С. 105-111.

9. Лойцянский, Л.И. Механика жидкости и газа/ Л.И. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – Изд. 6-е.

Расчет регулирования расхода через роторную ортогональную гидротурбину в связи с колебанием уровней верхнего и нижнего бьефов

Рассматривая работу гидроузла с включенной в его состав малой ГЭС, приходится учитывать изменения уровня режима верхнего и нижнего бьефов при изменении погодных условий, особенно это касается периода дождевых паводков рис. 1 [3].

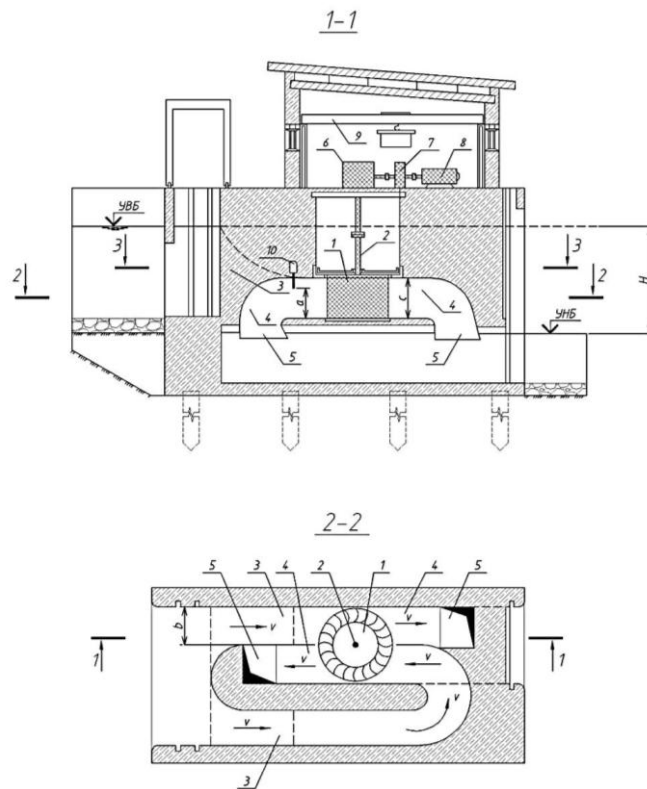


Рис. 1. Здание МГЭС в пределах стесненной речной долины: 1 – роторная турбина; 2 – вал; 3 – подводящие галереи; 4 – отводящие галереи; 5 – отсасывающие трубы; 6 – редуктор; 7 – устройство торможения; 8 – генератор; 9 – мостовой кран

Построенные малые гидроузлы создают изменения гидравлической картины водотока со стороны верхнего и нижнего бьефов. Со стороны верхнего бьефа водоподпорная плотина формирует кривую подпора, площадь водохранилища уширяется. Поступающая обильная приточность дождевых вод поднимает уровень верхнего бьефа. Но за счет уширения площади зеркала водохранилища подъем отметки уровня воды в верхнем бьефе незначителен.

В нижнем же бьефе кривая свободной поверхности водного потока мало меняется в сравнении с существующими бытовыми условиями до постройки гидроузла. Здесь подъем уровня воды более значителен, чем в верхнем бьефе. При этом будем считать, что изменение уровня режима в створе гидроузла наблюдается условно в течение 5 суток (рис. 2).

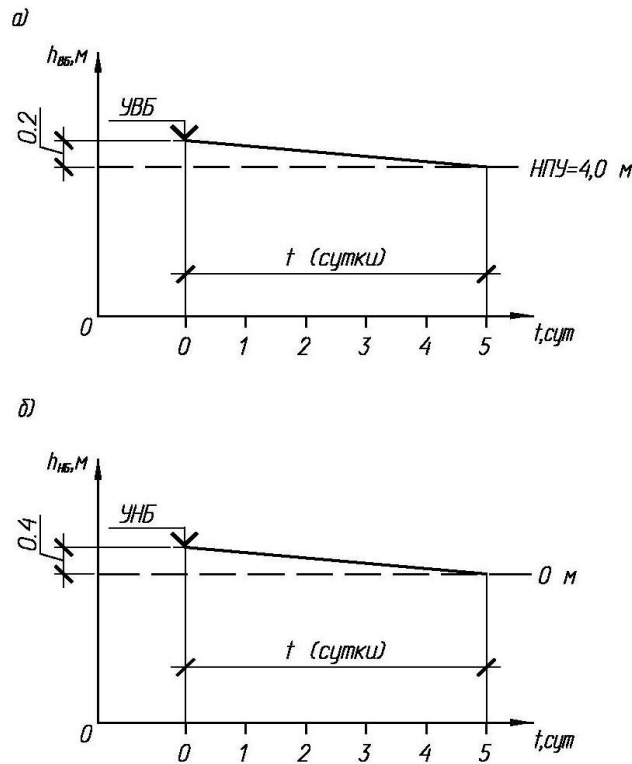


Рис. 2. График зависимости верхнего и нижнего бьефов от дождевого осадка: а) верхний бьеф; б) нижний бьеф

За счет таких условий следует ожидать уменьшение действующего напора. С тем, чтобы сохранить проектную мощность гидроагрегата, в создавшихся условиях следует предусмотреть увеличение расхода.

Мощность гидроагрегата малой ГЭС определяется по выражению [1]:

$$N = 9,81 \cdot \eta \cdot Q \cdot H, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где: 9,81 выражает ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$;

η – коэффициент полезного действия, состоящий из трех составляющих потерь: гидравлические, объемные и механические;

Q – расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напор, м.

Величина коэффициента полезного действия гидротурбины представляется в виде выражения [2]:

$$\eta = \eta_{\text{вых}} \cdot \eta_Q \cdot \eta_H \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (2)$$

где: $\eta_{\text{вых}}$ – учитывает потери при преобразовании гидравлической энергии в механическую, то есть потери при передаче энергии водного потока валу турбины;

η_Q – учитывает потери расхода при работе турбины, то есть энергию воды, проходящей мимо решетки лопастей;

η_H – учитывает потери напора;

$\eta_{\text{мех}}$ – учитывает потери на трение, связанное с вращением вала турбины (подшипники, подпятник).

В выражении (2) не будем учитывать потери $\eta_{\text{вых}}$ и $\eta_{\text{мех}}$, за счет движения водного потока учитываются потери расхода и напора.

Если учесть что $H=УВБ-УНБ$, нужно работать задвижкой, при этом сделать первоначальное допущение, что при H_{min} задвижка полностью поднята вверх и не оказывает никакого сопротивления, здесь сопротивление происходит только за счет водоворотного вальца.

При H_{max} задвижка опускается в первом приближении на самую большую высоту, за счет этого возникают потери напора и дополнительно потери на образование вальца, но потери на образование вальца в обоих случаях будут равны и соответственно потери не рассматриваются в расчетах.

Работа указанной задвижки определяется на основании расчетных зависимостей [4, 5]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \cdot \sqrt{2g \cdot H}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

$$Q = \mu_T \cdot \omega \cdot \sqrt{2g \cdot H}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где: H – перепад уровня воды в верхнем и нижнем бьефе, м;

ω – площадь живого сечения, м^2 ;

ξ – коэффициент сопротивления простой задвижки в галереях;

μ_T – коэффициент расхода.

Согласно $\omega = b \cdot c$, м^2 ; коэффициент сопротивления простой задвижки ξ находится по данным (табл. 1).

Таблица 1

Значение ξ для простой задвижки, перекрывающую подводящую галерею прямоугольного сечения

a/c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ξ	17,8	8,12	4,02	2,08	0,95	0,39	0,09

Строим график $f(H)=a/c$ для первого случая, когда УВБ больше, чем НПУ и наносим на него значение при случае, когда УНБ выше, чем изначальный.

Отмеченное первое приближение расчета основывалось на учете работы задвижки для самого начального момента. Но, чтобы выяснить наиболее неблагоприятное состояние с выработкой энергии малой ГЭС, следует рассмотреть влияние изменений напора через все суточные перепады, рис.2. Исходя из этого, находится наиболее неблагоприятное состояние с выработкой энергии малой ГЭС.

На схеме рис. 2 графические зависимости изменения уровней воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузла намечены в виде прямых линий. В естественных условиях эти линии и по продолжительности времени, и характера изменения зависят от рельефа местности. Потому они криволинейны. Последнее обстоятельство должно учитываться при работе малой ГЭС. Для этого необходимо составлять программу расчета работы малой ГЭС в связи с ожидаемыми дождевыми осадками в течение года.

Литература

1. Губин, Ф. Ф. Гидротехническое строительство сооружений и гидроэлектростанций : учеб. для вузов / Ф. Ф. Губин, Н. Н. Аршеневский, М. Ф. Губин ; ред. Ф. Ф. Губин. – М. : Энергия, 1972. - 504 с.
2. Аршеневский, М. Ф. Гидротехнической станции : учеб для вузов / Н.Н. Аршеневский, М. Ф. Губин, В. Я. Карелин [и др]. - 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатом-издат, 1987. – 464 с.
3. Гоголев, Е. С., Использование гидроэнергоресурсов малых рек / Е. С. Гоголев, Г. А. Наумов // Великие реки 2008 : междунар. науч. – пром. форум «Великие реки 2008» / ICEF, 20 – 30 мая 2008 г. конгресса междунар. науч. – пром.форума «Великие реки 2008». – Н. Новгород, 2009. – С. 58-61.
4. Чугаев, Р. Р. Гидравлика : Учеб. для вузов / Р. Р. Чугаев – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с.
5. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1992. — 672 с.

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ
МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ**

УДК 517:519.6

Р.С. Бирюков

**Вычисление оптимального уровня гашения в задаче обобщенного
 H_∞ -оптимального управления при помощи метода Вегстейна**

1. Введение. При разработке стратегий управления объектом в случае, когда ни начальное состояние, ни внешнее возмущение точно не известны, разумно основываться на принципе гарантированного результата, когда о качестве управления судят по наихудшему возможному случаю.

Если на объект не действует внешнее возмущение, то, следуя [1, 2], назовем уровнем гашения начальных возмущений максимально возможное отношение L_2 -нормы его целевого выхода к евклидовой норме начального состояния. Закон управления, минимизирующий уровень гашения, называется γ -оптимальным.

В случае, когда начальное состояние объекта нулевое и на него действует внешнее возмущение, под уровнем гашения внешнего возмущения понимают наибольшее значение отношения L_2 -нормы целевого выхода объекта и возмущения. Задача минимизации уровня гашения совпадает с классической задачей H_∞ -оптимального управления [3, 4].

Особый интерес представляет ситуация, когда объект находится в неизвестном начальном состоянии и на него действует внешнее возмущение. В этом случае в [5] в качестве уровня гашения рассматривалось наибольшее отношение L_2 -нормы целевого выхода к квадратному корню от суммы квадрата L_2 -нормы внешнего возмущения и заданной квадратичной формы начального состояния. Подобный подход называется обобщенным H_∞ -оптимальным управлением. Используя вариационный подход, в [6] было показано, что вычисление оптимального уровня гашения сводится к решению нелинейной краевой задачи для некоторого дифференциального матричного уравнения Риккати, которая, в силу нелинейности, может быть решена аналитически лишь в «вырожденных» случаях.

В данной работе рассматривается метод Вегстейна для эффективного построения численного решения указанной краевой задачи.

2. Постановка задачи и предварительные сведения. Рассмотрим на отрезке $[0, T]$ линейный управляемый объект

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B_1(t)v + B_2(t)u, & x(0) &= x_0, \\ z &= C(t)x + D(t)u, \end{aligned} \quad (1)$$

в котором $x \in R^{n_x}$ – состояние объекта, $u \in R^{n_u}$ – управление, $z \in R^{n_z}$ – управляемый выход и $v \in R^{n_v}$ – возмущение, а $A = A(t)$, $B_1 = B_1(t)$, $B_2 = B_2(t)$, $C = C(t)$ и $D = D(t)$ – заданные матричные функции соответствующих порядков. В дальнейшем для краткости будем опускать указание аргумента t , если это не вызывает недоразумений. Также предположим, что $\forall t \in [0, T]$ справедливо $D^T(t)D(t) > 0$ и $C^T(t)D(t) = 0$.

Относительно возмущения $v(t)$ будем предполагать, что $v \in L_2[0, T]$, т. е. справедливо неравенство

$$\|v\|^2 = \int_0^T |v|^2 dt < +\infty, \quad |v|^2 = v^T v.$$

В качестве допустимых законов управления для системы (1) будем рассматривать такие $u = u(t)$, при которых для любых возмущений $v \in L_2[0, T]$ существует и единственно решение системы (1). Данное множество управлений будем в дальнейшем обозначать через U . Очевидно, что с учетом сделанных предположений для любого решения системы (1) управляемый выход $z(t)$ также будет принадлежать $L_2[0, T]$.

Определим для системы (1) при выбранном законе управления u уровень гашения возмущений $\gamma(u)$ следующей формулой [5]:

$$\gamma(u) = \sup_{(x_0, v) \in W} \left[\frac{\|z\|^2 + x^T(T)Sx(t)}{\|v\|^2 + x_0^T R x_0} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $W := \{(x_0, v) \in R^{n_x} \times L_2[0, T] : \|v\|^2 + x_0^T R x_0 \neq 0\}$, $S^T = S \geq 0$ и $R^T = R > 0$.

Задача обобщенного H_∞ -оптимального управления системой (1) состоит в определении такого управления $u \in U$, при котором уровень гашения возмущений $\gamma(u)$ в (1) будет наименьшим, т. е.

$$\gamma^* = \inf_{u \in U} \gamma(u) = \inf_{u \in U} \sup_{(x_0, v) \in W} \left[\frac{\|z\|^2 + x^T(T)Sx(t)}{\|v\|^2 + x_0^T R x_0} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

при этом γ^* называется оптимальным уровнем гашения. Справедлива следующая теорема [5, 6].

Теорема.1 *Задача (3) для системы (1) имеет единственное решение тогда и только тогда, когда на интервале $[0, T]$ существует решение*

$X(t)$ матричного дифференциального уравнения Риккати

$$\dot{X} + A^T X + XA + C^T C - X \mathbf{B}_2 (D^T D)^{-1} B_2^T - \gamma^{-2} B_1 B_1^T X = 0, \quad X(T) = S. \quad (4)$$

Оптимальный уровень гашения

$$\gamma^2 = \lambda_{\max}(R^{-1} X(0)), \quad (5)$$

где через $\lambda_{\max}(R^{-1} X(0))$ обозначено максимальное собственное число матрицы $R^{-1} X(0)$, достигается при минимаксном законе управления

$$u^*(t) = -(D^T D)^{-1} B_2^T X(t)x(t), \quad (6)$$

наихудшем внешнем возмущении

$$v^*(t) = \gamma^{-2} B_1^T X(t)x(t) \quad (7)$$

и наихудших начальных условиях

$$x_0 = \alpha e, \quad \alpha^{-2} = e^T \mathbf{R} + \gamma^{-4} \int_0^T \Phi^T(t,0) X(t) B_1 B_1^T X(t) \Phi(t,0) dt e, \quad (8)$$

где $\Phi(t,0)$ – фундаментальная матрица решений замкнутой системы, e – единичный собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу матрицы $R^{-1} X(0)$.

Заметим, что поскольку в уравнение (4) входит неизвестный параметр γ , то оно не может быть решено отдельно от условия (5), а совместно они представляют собой нелинейную краевую задачу, решением которой являются как матричная функция $X(t)$, так и параметр γ . В виду нелинейности данных уравнений краевая задача может быть решена аналитически лишь в исключительных случаях, поэтому возникает необходимость использовать численные методы. В следующем параграфе описывается применение метода Вегстейна для решения поставленной задачи.

3. Численное решение краевой задачи. Для решения краевой задачи (4) – (5) рассмотрим соотношение (5) как нелинейное уравнение относительно $\mu = \gamma^2$:

$$\mu = f(\mu) = \lambda_{\max}(R^{-1} X(0)),$$

зависящее от решения (4). Положим $\hat{\mu}_0 = \mu_0$ и $\hat{\mu}_1 = \mu_1$ – начальные значения, тогда итерационная формула метода Вегстейна имеет вид [7]:

$$\hat{\mu}_{k+1} = \frac{\mu_{k+1} \hat{\mu}_{k-1} - \mu_k \hat{\mu}_k}{\mu_{k+1} + \hat{\mu}_{k-1} - \mu_k - \hat{\mu}_k}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

и

$$\mu_{k+1} = f(\hat{\mu}_k), \quad k = 0, 1, \dots \quad (10)$$

В качестве критерия останова можно использовать условие $|\mu_{k+1} - \hat{\mu}_k| < \varepsilon$, где ε – заданная точность. Отличительной особенностью метода Вегстейна по сравнению с методом простых итераций, является его сходимость даже в случае $|f'(\mu)| \geq 1$.

Окончательно получаем, что на каждом шаге метода по формулам (9) – (10) необходимо решать уравнение (4) с заданными начальными условиями. Приведем схему вычислений:

Шаг 1. Задать допустимую абсолютную погрешность $\varepsilon > 0$ и начальное приближение μ_0 .

Шаг 2. Вычислить $\mu_1 = f(\mu_0)$ и положить $\hat{\mu}_0 = \mu_0$ и $\hat{\mu}_1 = \mu_1$.

Шаг 3. Вычислить $\mu_2 = f(\hat{\mu}_1)$.

Шаг 4. Если $|\mu_{k+1} - \hat{\mu}_k| > \varepsilon$, то вычислить $\hat{\mu}_2$ по формуле (9) и переприсвоить значения $\hat{\mu}_0 = \hat{\mu}_1$, $\hat{\mu}_1 = \hat{\mu}_2$ и $\mu_1 = \mu_2$. Вернуться на шаг 2.

Шаг 5. Положить $\mu^* = \mu_2$.

В качестве иллюстрации изложенного алгоритма рассмотрим систему первого порядка

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -x + u + v, \\ z &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u, \end{aligned}$$

для которой $S \geq 0$ и $R > 0$.

Согласно теореме оптимальное значение уровня гашения определяется как решение задачи (4) – (5):

$$X + 1 - 2X - (1 - \gamma^{-2})X^2 = 0, \quad X(T) = S, \quad \gamma^2 = \lambda_{\max}(R^{-1}X(0)).$$

Для численного интегрирования использовался метод Рунге – Кутты с модификацией Мерсона. Вычисления проводились с точностью $\varepsilon = 10^{-3}$ при $S = 0.5$ и $R = 1.1$ с различными начальными условиями, результаты вычислений представлены в таблице.

T	Приближенное значение	Начальное приближение	Число итераций
0.5	0.3657	1.5	2
1.0	0.4845	0.5	1
1.0	0.4846	1.5	3
2.5	0.5738	1.5	5
5.0	0.5870	0.5	4

4. Заключение. В данной статье рассмотрен численный метод отыскания оптимального уровня гашения в задаче обобщенного H_∞ -оптимального управления. Показано, что задача может быть эффективно решена методом Вегстейна, базирующимся на методе простой итерации, при этом начальное приближение можно выбирать в достаточно широких пределах.

Литература

1. Баландин, Д.В. Синтез оптимальных линейно-квадратичных законов управления на основе линейных матричных неравенств/ Д.В. Баландин, М.М. Коган // АиТ. – 2007. – № 3. – С. 3-18.

2. Баландин, Д.В. Линейно-квадратичные и γ -оптимальные законы управления/ Д.В.Баландин, М.М. Коган // АиТ. 2008. № 6. С. 5-14.

3. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems/ J.C.Doyle, K.Glover, P.P.Khargonekar, B. A.Francis// IEEE Trans. Automat. Control. - 34:8 (1989). – P. 831-847.

4. Kwakernaak, H. Robust control and H_∞ -optimization – Tutorial paper/ H. Kwakernaak// Automatica. – 29:2 (1993). – P. 255-273.

5. Khargonekar, P.P. H_∞ control with transients/ P.P.Khargonekar, K.M. Nagpal, K.R. Poolla // SIAM J. Control Optim. – 29:6 (1991). – P. 1373-1393.

6. Lu, W.W. A variational approach to H_∞ control with transients/ W.W.Lu, G.J. Balas, E.B. Lee// IEEE Trans. Automat. Control. – 44 (1999). – P. 1875-1879.

7. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов/ В. М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2002.

УДК 512.644

И.В. Ушакова

Два метода построения наблюдателей для линейных динамических систем

1. Введение и постановка задачи

Рассмотрим динамическую систему с неизвестными состояниями

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

с измеряемым выходом

$$y(t) = C(t)x(t). \quad (2)$$

Для нее восстановим вектор состояния $x(t)$ или, другими словами, найдем оценку этого вектора по данным о выходе $y(t)$ системы. Оценка состояния системы обозначим $\hat{x}(t)$.

Для определения оценки состояния системы, в современной науке используют задачу наблюдения. Под наблюдателем понимается динамическая система, выходная переменная которой со временем приближается к состоянию, которое необходимо восстановить. Известно, что динамические уравнения этого n -мерного наблюдателя имеют вид

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + K[y(t) - C\hat{x}(t)], \quad \hat{x}(t_0) = 0$$

или

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A - KC]\hat{x}(t) + Ky(t), \quad \hat{x}(0) = 0. \quad (3)$$

Схема такого наблюдателя представлена на рис.1.

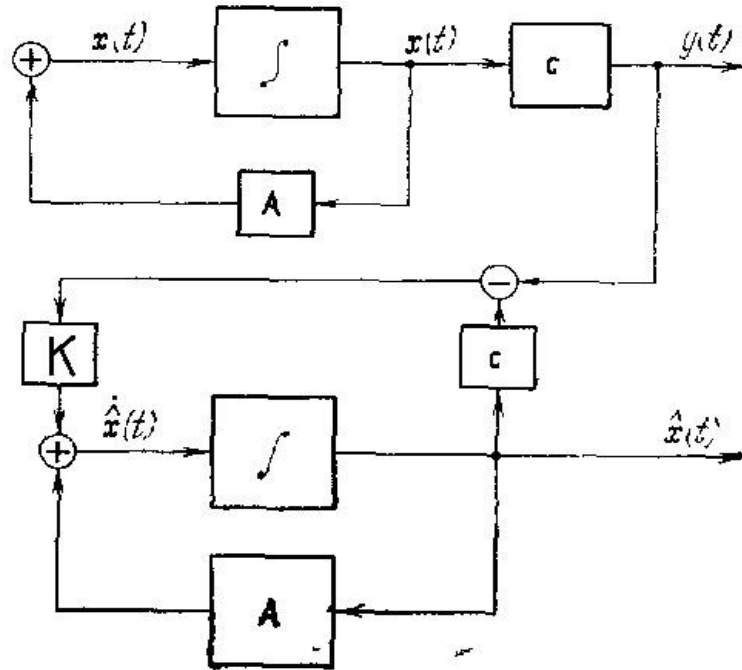


Рис.1. Динамическая система – наблюдатель

На вход этого наблюдателя поступает выход исходной системы. Выход $y(t) = C(t)x(t)$ сравнивается с выходом $\hat{y}(t) = C(t)\hat{x}(t)$, и их разность является сигналом ошибки и подается на вход системы в качестве корректирующего воздействия. Именно разность $y - \hat{y} = Cx - C\hat{x}$ умножается на матрицы K и подается на входы интеграторов наблюдателя. Динамические свойства такого наблюдателя существенно зависят от выбора матрицы K . За счет выбора этого вектора можно обеспечить желаемый характер стремления разности $x(t) - \hat{x}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. [1].

Обозначим ошибку оценки состояния

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t).$$

Вычитая из уравнения (1) уравнение (3), получим уравнение вектора ошибки оценки состояния в виде

$$\dot{\tilde{x}}(t) = [A - KC] \tilde{x}(t), \quad \tilde{x}(0) = x_0. \quad (4)$$

Из уравнения видно, что если $A - KC$ асимптотически устойчива, то ошибка оценки состояния $\tilde{x}(t) \rightarrow 0$. Поэтому, задача синтеза наблюдения заключается в выборе матрицы K , обеспечивающей асимптотическую сходимость вектора ошибки оценки состояния. В статье приведен сравнительный анализ двух подходов для нахождения матрицы K .

2. Решение задачи

Один из методов для асимптотической сходимости в современной теории устойчивости основан на методе функции Ляпунова. Суть метода состоит в подборе такой положительно определенной функции $V(x)$, производная которой в силу соответствующей системы $\dot{V} < 0$. В статье

рассмотрен подход нахождения K таким образом, чтобы динамическая система была асимптотически устойчивой с заданной степенью устойчивости α . Иными словами должно выполняться

$$\dot{V} + 2\alpha V < 0. \quad (5)$$

Рассмотрим уравнение вектора ошибки оценки состояния (4), подставим в неравенство (5) и получим

$$X(A - KC) + (A - KC)^T X + 2\alpha X < 0.$$

Раскрывая скобки и делая замену $XK = Z$, приходим к линейному матричному неравенству вида

$$XA + A^T X - ZC - C^T Z^T + 2\alpha X < 0, \quad X = X^T > 0.$$

Полученное неравенство принято называть линейным матричным неравенством. Неравенства такого типа решаются относительно матриц X и Z в пакете MatLab. Матрица K выражается через соотношение $K = X^{-1}Z$ [3].

Во втором подходе будем выбирать матрицу K из условия оптимизации переходного процесса.

Рассмотрим динамическую систему вида

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}(t) = [A - KC_2] \tilde{x}(t), \tilde{x}(0) = x_0 \\ \tilde{z} = C_1 \tilde{x} \end{cases} \quad (6)$$

с функционалом вида $Y = \int_0^{\infty} |\tilde{z}|^2 dt$. По известной теореме функционал Y на траекториях этой системы выражается следующим образом через функцию Ляпунова

$$\int_0^{\infty} |\tilde{z}|^2 dt = x_0^T P x_0. \quad (7)$$

Функционал зависит от начальных условий, которые в данной задаче не известны. В качестве критерия рассмотрим

$$\max_{x_0 \neq 0} \frac{\int_0^{\infty} |\tilde{z}|^2 dt}{|\tilde{x}_0|^2} = \max_{x_0 \neq 0} \frac{\tilde{x}_0^T P \tilde{x}_0}{|\tilde{x}_0|^2} = \lambda_{\max}(P). \quad (8)$$

Матрица K выбирается таким образом, чтобы выполнялось $\min_K \lambda_{\max}(P)$. Это эквивалентно выбору матрицы K из условия, что $P < \gamma^2 I$ при минимизации γ .

Решение этой задачи сводится к линейному матричному неравенству

$$PA + A^T P - ZC_2 - C_2^T Z^T + C_1^T C_1 < 0,$$

где $P = P^T > 0$, $P < \gamma^2 I$, $PK = Z$. Также решаем неравенство данного типа в пакете MatLab относительно матриц P и Z . Находим K из выражения $K = P^{-1}Z$.

3. Результаты численного моделирования.

В пакете MatLab были проведены соответствующие вычисления для уравнений 2-го порядка типа линейный осциллятор и построены графики зависимости функционала Y от различных начальных условий. Пунктиром представлен график, основанный на выборе степени устойчивости, а сплошной – второй подход, который можно назвать минимаксным.

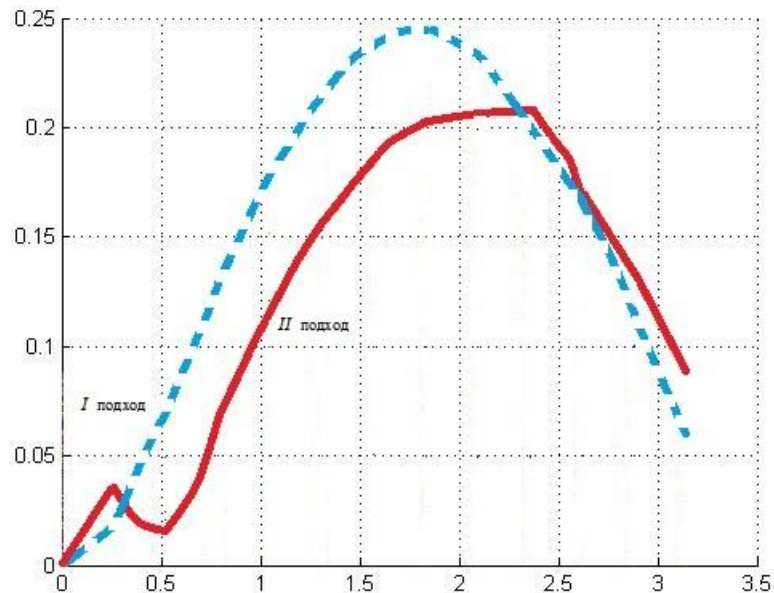


Рис. 2. График зависимости функционала Y от различных начальных условий

Литература

1. Андреев, Ю.Н., Управление конечномерными линейными объектами / Ю.Н. Андреев – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976.
2. Квакернаак, Х., Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван – М.: Мир, 1977.
3. Баландин, Д.В., Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств/ Д.В. Баландин, М.М. Коган – М.: Физматлит, 2007.

СОДЕРЖАНИЕ

Строительные материалы. Строительные конструкции.	
Строительная и теоретическая механика	
<i>Ал Обайди Каван Таха Ибрахим</i> Концепция «пассивного» дома.....	3
<i>Девушкина О.С.</i> Современные проблемы проектирования оболочек двойкой кривизны.....	5
<i>Денискина А.С.</i> Создание сети внутригородских дамб в Нижнем Новгороде середины XIX века.....	10
<i>Жданова С.А.</i> Экспериментальное исследование влияния конструктивных особенностей поперечного сечения профилей типа ПН и ПС на формы потери несущей способности при центральном сжатии.....	13
<i>Звездов П.П.</i> Об обеспечении качества бетонных поверхностей при формировании и выдерживании железобетонных конструкций.....	18
<i>Зубрилов А.С.</i> Определение редуцированного сечения тонкостенного гнутого профиля при расчёте на устойчивость плоской формы изгиба.....	23
<i>Исаева Н.М.</i> О выборе рациональных параметров односетчатых звездчатых куполов.....	27
<i>Клиньшов И.В.</i> Формообразование квадратных в плане сетчатых сводов двойкой кривизны.....	31
<i>Ламзин Д.А.</i> К методике определения параметров и констант математических моделей динамического деформирования хрупких материалов.....	35
<i>Лобов Д.М., Тихонов А.В.</i> Сравнительный анализ несущей способности изгибаемых деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при различном варианте армирования.....	41
<i>Рябова О.Н.</i> Уторный узел с компенсатором стальных вертикальных цилиндрических резервуаров.....	46
<i>Селин А.Н.</i> Подкрановые конструкции в системе каркаса промышленного здания.....	50
<i>Сухова Т.В.</i> Исследование устойчивости сжатых прямоугольных пластин с отверстиями.....	54
<i>Тихонычева У.Е.</i> Проблемы проектирования высотных многофункциональных энергоэффективных зданий для северной части субарктической зоны Мурманской области.....	59
<i>Фатеев В.В.</i> Экспериментальная установка для испытаний горизонтальными нагрузками моделей свайных фундаментов с однорядным расположением призматических свай.....	63
<i>Филиппова М.А.</i> Большепролетные светопрозрачные конструкции для стадионов России.....	69

<i>Хазов П.А.</i> Повреждение конструкционных материалов, инженерные методы расчета на усталость.....	74
-------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Теплогасоснабжение. Отопление и вентиляция.

Водоснабжение и водоотведение. Гидравлика.

Гидротехнические сооружения

<i>Ватулин Н.С.</i> Зарубежные методы обезжелезивания подземных вод. Метод «Виредокс».....	79
<i>Дзиминскайте О.Ч.</i> Технологии биологического удаления азота и фосфора.....	82
<i>Зац М.А.</i> Использование геотермальных ресурсов в энергетике России.....	86
<i>Ватулин Н.С.</i> Гидропневматические установки в системах водоснабжения автономных объектов из подземного источника.....	91
<i>Иванова Е.А.</i> Разработка комплексных энергосберегающих технологий в промышленной котельной.....	97
<i>Крупинов А.С.</i> Определение длины береговой линии водохранилищ с использованием метода фракталов.....	100
<i>Кузин В.Ю.</i> Оценка негативного влияния изменения конструктивных элементов систем вентиляции гражданских зданий в режиме эксплуатации.....	103
<i>Львов Д.А.</i> Перспективы использования детандер-генераторных агрегатов.....	108
<i>Муравьева Е.С.</i> Методические основы проведения энергоаудита высшего учебного заведения.....	112
<i>Мустакимова С.А.</i> Использование ANSYS для исследования гидродинамики и теплообмена течения жидкости в пружинно-витом канале.....	116
<i>Янченко М.А.</i> Расчет регулирования расхода через роторную ортогональную гидротурбину в связи с колебанием уровней верхнего и нижнего бьефов.....	119

Системный анализ, управление и обработка информации

<i>Бирюков Р.С.</i> Вычисление оптимального уровня гашения в задаче обобщенного H_∞ -оптимального управления при помощи метода Вегстейна.....	123
<i>Ушакова И.В.</i> Два метода построения наблюдателей для линейных динамических систем.....	127