

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 12 (112)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2008

ISSN 1991-9743

СЕРИЯ

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

Выпуск 6

ПОСВЯЩАЕТСЯ
65- ЛЕТИЮ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Редакционная коллегия:

д.т.н., профессор **В.М. Асташкин** (*отв. редактор*); **Т.А. Кравченко** (*отв. секретарь*);
д.т.н., профессор **С.Г. Головнев**; д.т.н. **С.Е. Денисов**; к.т.н., доцент **Ю.Ф. Кутин**;
к.т.н., профессор **Ю.В. Максимов**; д.т.н., профессор **В.И. Панферов**; д.т.н., профессор
А.Н. Потапов; к.т.н., профессор **В.В. Спасибожко**; д.т.н., профессор **Б.Я. Трофимов**.

СОДЕРЖАНИЕ

СПАСИБОЖКО В.В., МАКСИМОВ Ю.В. Творческое и научное наследие профессора
А.А. Оатула (к 90-летию со дня рождения А.А. Оатула и 50-летию кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ) 3

Градостроительство и архитектура

СИБРИКОВА М.А. Закономерности движения транспортных потоков в г. Челябинске ... 8

Содержание

Строительные материалы, изделия и конструкции

- ЗИМИЧ В.В., КРАМАР Л.Я., ТРОФИМОВ Б.Я. Влияние различных видов затворителей на гигроскопичность магнезиального камня 13
- БАЙБУРИН А.Х., НИКОНОВ С.В. О допуске на размеры монолитных конструкций гражданских зданий 16

Теория расчета строительных конструкций

- САБУРОВ В.Ф., ИВАШЕНКО Ю.А., КОЗЬМИН Н.Б., ГУСЕВА Н.В. Экспериментальное исследование модели покрытия ледового дворца в г. Челябинске 19
- РАКИТИН Б.А., СОЛОВЬЁВ Б.В. Проектирование и лабораторные испытания безнапорных железобетонных труб малого диаметра 25

Инженерное оборудование зданий и сооружений

- ПАНФЕРОВ В.И., АНИСИМОВА Е.Ю. Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления 30
- ДЕНИСЕНКО Ю.Н., КАЛЯГИН Г.И., КРАМАР Д.М., ПАНФЕРОВ В.И., ТОКАРЕВ В.М. Автоматизированная установка для исследования характеристик отопительных систем 38
- ДЕНИСЕНКО Ю.Н., ПАНФЕРОВ В.И. К теории моделирования систем отопления 43
- ВАСИЛЬЕВ Ю.С., КРЕСТЬЯНКИН Д.В., НАГОРНАЯ А.Н., ПАНФЕРОВ В.И. Приведение многослойных ограждающих конструкций к однослойным при тепловых расчетах 49

- Сведения об авторах** 58

ТВОРЧЕСКОЕ И НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА А.А. ОАТУЛА

(к 90-летию со дня рождения А.А. Оатула и 50-летию кафедры
«Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ)

В.В. Спасибожко, Ю.В. Максимов

Показаны этапы создания научной школы профессора А.А. Оатула по исследованию и применению железобетонных конструкций зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве, отражен его вклад в строительную науку, в становление и развитие кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения», в воспитание и подготовку научно-педагогических кадров.



А.А. Оатул

В 1957 году на должность заведующего кафедрой строительных конструкций Челябинского политехнического института (ЧПИ) был избран доцент, канд. техн. наук Александр Александрович Оатул, приглашенный из Уральского политехнического института (УПИ) Свердловска.

Его по праву считают основателем научной школы строительных конструкций на Южном Урале, известным ученым-строителем, талантливым педагогом и воспитателем. А.А. Оатул родился 29.01.1918 г. в г. Кишиневе, где окончил классическую гимназию. Его отец – А.И. Оатул – окончил Дерптский (Юрьевский) университет, имел ученую степень кандидата исторических наук, работал попечителем народного образования в г. Кишиневе и директором мужской гимназии, преподавал историю. Мать – О.А. Оатул (урожденная Карпи) – окончила частную гимназию, преподавала математику в гимназии, где работал А.И. Оатул.

Высшее образование А.А. Оатул начал осваивать в Бухарестском политехническом институте в

1936 г., затем учился в Одесском строительном институте (1940–1941 гг.), а окончил с отличием Уральский индустриальный институт в 1944 г. Трудовую деятельность он начал в июне 1940 г. техником-строителем при ГорОНО г. Кишинева. Затем, после эвакуации из Одессы, работал гидротехником Бухарского облводхоза в Гиждуване Узбекской ССР (сентябрь 1941 г. – март 1942 г.). Служил в РККА в трудармии на 3-м строительном участке в системе ЮУЖД (строительный мастер в Челябинске, Еманжелинске, В. Уфалее). С осени 1942 г. работал лаборантом кафедры строительных конструкций УПИ. В 1943–1945 гг. руководил строительством объектов подсобного хозяйства института, с 1944 г. начал преподавательскую работу, работал ассистентом, старшим преподавателем, доцентом. Он преподавал сопротивление материалов в группе, где учился будущий первый Президент России Б.Н. Ельцин.

В 1949 г. А.А. Оатул защитил в УПИ кандидатскую диссертацию на тему: «Расчет арок со сквозным надарочным строением», в которой представил аналитический метод расчета арки с надарочным строением как единой монолитной конструкции рамного типа.

Молодой, энергичный, с деловым задором А.А. Оатул был воспринят студентами и преподавателями ЧПИ как человек, принесший с собой лучшие традиции высшей школы России. С его именем связывали надежды по созданию научной школы конструкторов-строителей в г. Челябинске. Это оправдалось благодаря его большой трудоспособности, организаторскому таланту и высокому профессионализму. Кафедра «Строительные конструкции» начала формироваться из дипломированных специалистов первого и второго выпуска (1957–1958 гг.) инженерно-строительного факультета ЧПИ.

Научный и преподавательский потенциал кафедры составили профессор А.А. Абаринов –

главный инженер Челябинского завода металлоконструкций; доцент, канд. техн. наук Г.М. Сундюков – выпускник 1951 г. кафедры «Основания и фундаменты» гидротехнического факультета Ленинградского политехнического института; доцент, канд. техн. наук А.Ф. Кузнецов – аспирант школы МИСИ, руководителем которой был член-корреспондент АН СССР Н.С. Стрелецкий.

В 1960 г. на кафедре «Строительные конструкции» ЧПИ была открыта аспирантура, благодаря чему решался вопрос подготовки собственных научно-педагогических кадров. Все молодые преподаватели, которых ветераны называли «мальчиками Оатула», прошли научную и педагогическую подготовку в аспирантуре ЧПИ и других вузов.

Решающую роль в развитии и становлении инженерно-строительного факультета и его материально-технической базы сыграло решение, принятое в 1957 г. по инициативе декана, канд. техн. наук Ф.Г. Шумилина, о строительстве лабораторного корпуса. В строительстве здания корпуса принимали участие преподаватели и студенты факультета. После ввода его в эксплуатацию в 1961 г. кафедра «Строительные конструкции» создала хорошую лабораторную базу, оснащенную современным силовым и измерительным оборудованием, обеспечивающим выполнение исследований на высоком теоретическом и экспериментальном уровне.

В 1962 г. кафедра «Строительные конструкции» была разделена на две кафедры: «Железобетонные и каменные конструкции» (ЖБК), которой стал заведовать доцент, канд. техн. наук А.А. Оатул, и «Металлические и деревянные конструкции» (МиДК), которую возглавил профессор А.А. Абарин – крупнейший специалист в области технологии изготовления металлических конструкций.

А.А. Оатул проделал большую работу по формированию и воспитанию коллектива новой кафедры. При этом проявились его высокие организаторские способности и талант мудрого и требовательного руководителя. Для преподавателей и аспирантов кафедры он был учителем, наставником, научным руководителем и коллегой.

Организующим началом деятельности кафедры был постоянно действующий научно-методический семинар (рук. А.А. Оатул), на котором излагались базисные вопросы теоретической механики, численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений, основы теории вероятности и математической статистики, технологии и теории бетона и железобетона, необходимые для творческих исследований и развития строительной науки. Особое внимание обращалось на изучение методов теории вероятности и математической статистики, освоение метода конечных элементов (МКЭ), который является мощным универсальным аппаратом для решения инженерных задач с помощью ЭВМ. Параллельно члены кафедры осваивали приемы работы на ЭВМ различ-

ных типов в ВЦ института, а также в порядке стажировки в вузах Москвы, Ленинграда, Киева и других городов. Большой вклад в компьютеризацию учебного процесса и научных исследований внесли на первом этапе Ю.Ф. Кутин, А.А. Карякин, В.Г. Колбасин, В.В. Пасешник, начальник ЭВМ В.Б. Самусев – выпускник приборостроительного факультета ЧПИ.

С самого начала формирования научного направления на кафедре ЖБК был взят курс на применение во всех расчетах нелинейных зависимостей между деформациями и напряжениями арматуры и бетона с учетом рекомендаций зарубежных исследователей.

А.А. Оатул обладал хорошей математической подготовкой, знаниями сопротивления материалов, теории упругости и пластичности, строительной механики. Он изучал зарубежную научную литературу, владел молдавским, румынским, французским, английским и немецким языками. Хорошую подготовку получил он в гимназии и всегда вспоминал с благодарностью своих родителей. Он постоянно пополнял и углублял свои знания и к этому призывал молодежь.

А.А. Оатул создал в ЧПИ научную школу строительных конструкций и подготовил 28 кандидатов технических наук, из них 8 стали заведующими кафедрами и ведущими специалистами. Среди них В.Г. Матвеев – МГТУ им. Носова, В.И. Миловидов – Златоустовский филиал ЮУрГУ, И.И. Пантелькин – Липецкий ГТУ. Под руководством А.А. Оатула проходили научно-педагогическую подготовку аспиранты-целевики из Бреста, Липецка, Львова, Магнитогорска.

Из своих учеников и последователей А.А. Оатул создал дружный и квалифицированный коллектив преподавателей и научных сотрудников кафедры ЖБК, способный решать на современном уровне учебно-методические и научные проблемы в области теории и практики железобетона. Под его руководством в ЧПИ была создана крупная вузовская научно-исследовательская лаборатория строительных конструкций с несколькими отделами, которая работала при координации и консультации лабораторий НИИЖБ Госстроя СССР (директор К.В. Михайлов).

Отдел подземных сооружений этой лаборатории выполнял работы по расчету, проектированию и внедрению в производство новых сборно-монолитных железобетонных конструкций подземных сооружений металлургических предприятий. В отделе работали: В.Г. Колбасин, Г.Н. Запрутин, С.А. Сонин и др. На развитие этого направления существенное влияние оказал главный инженер треста «Челябметаллургстрой» А.С. Черный, который ставил перед кафедрой практические задачи и оказывал финансовую и материально-техническую помощь при выполнении исследований и натурных испытаний железобетонных конструкций.

Отдел динамики железобетона занимался исследованием, реконструкцией и обеспечением надежности железобетонных фундаментов под турбоагрегаты ТЭС мощностью от 100 до 1200 МВт. Здесь трудились: А.П. Новоселов, В.В. Кузьмин, Н.В. Троицкий и др. Они принимали участие в проектировании и эксплуатационных испытаниях фундаментов под турбоагрегаты Запорожской, Костромской, Пермской, Троицкой ГРЭС; Челябинских ТЭЦ. В процессе эксплуатации проводили испытания по регулированию вибрационного и теплового воздействия на систему фундаментов и турбоагрегатов на Ангренской и Аргаяшской ГРЭС, Белоярской АЭС, Ириклинской, Рефтинской, Сургутской, Южно-Уральской и др. ГРЭС. Доцент, канд. техн. наук А.П. Новоселов консультировал специалистов Ирака по выбору оптимального режима эксплуатации фундаментов и агрегатов электростанции.

Отдел канатной арматуры разрабатывал и испытывал новые виды арматурных канатов для балок и ферм промышленных зданий, плит покрытий большепролетных оболочек, дымовых труб высотой до 450 м. Это был большой работоспособный коллектив, в котором объединились: Ю.В. Максимов, Б.В. Соловьев, В.И. Миловидов, В.В. Пасешник, А.А. Карякин, Б.А. Евсеев, В.А. Марков, Б.Ф. Бессонов, И.О. Золотарев и др.

В 1963 г. Ю.В. Максимов под руководством А.А. Оатула определил и возглавил новое научное направление на кафедре – «Разработка, исследование и применение арматурных канатов в качестве напрягаемой арматуры в крупноразмерных предварительно напряженных железобетонных конструкциях». С помощью канатной арматуры было осуществлено армирование и предварительное обжатие уникальных большепролетных железобетонных оболочек покрытий торговых зданий в Челябинске (торговый центр) и Минске (центральный рынок) с размерами в плане до 103×103 м.

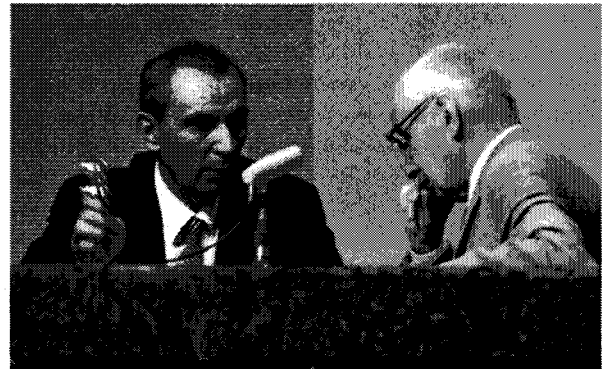
Рациональное использование высокопрочной арматуры в предварительно напряженных железобетонных конструкциях невозможно без использования высокопрочных бетонов. Для развития нового направления в состав лаборатории был введен отдел предварительно напряженных конструкций с применением высокопрочных и эффективных облегченных бетонов, который проектировал, изготавливал и испытывал конструкции, разрабатывал рекомендации по применению конструкций сегментных стропильных ферм пролетом 24 м из бетона М 600 (В 40), дисперсно-армированных (фибробетонных) плит аэродромных и дорожных покрытий, напорных железобетонных труб. Отдел объединил знания и исследовательскую деятельность Б.В. Соловьева, Б.А. Евсеева, А.Г. Зивы, С.И. Демакова и др.

В составе лаборатории был создан отдел новых конструкций, который разрабатывал оригинальные железобетонные элементы каркасов од-

ноэтажных промышленных и многоэтажных гражданских зданий. В отделе работали Ю.А. Ивашенко, Ю.Ф. Кутин, Н.Р. Габбасов, А.Д. Лобанов, М.К. Палкин и др.

В июне 1965 г. в ЧПИ по инициативе А.А. Оатула было проведено большое совещание ученых СССР по проблеме сцепления арматуры с бетоном под председательством профессора, докт. техн. наук, директора НИИЖБ К.В. Михайлова.

Преподаватели и сотрудники кафедры ЖБК, наряду с исследованиями по целевым программам, выполняли работы по обследованию зданий и сооружений, разрабатывали рекомендации по усилению конструкций и их восстановлению. Характерной особенностью деятельности коллектива кафедры под руководством А.А. Оатула была тесная связь науки со строительным проектированием и производством. Основным научным достижением А.А. Оатула в развитии теории железобетона является выдвижение, обоснование и разработка исходных принципиально важных положений теории сцепления арматуры с бетоном. Научное направление было определено выдающимся ученым с мировым признанием докт. техн. наук, профессором Алексеем Алексеевичем Гвоздевым – заведующим лабораторией теории железобетона НИИЖБ Госстроя СССР.



А.А. Оатул (слева) и А.А. Гвоздев в президиуме совещания ученых СССР. Июнь 1965 г., ЧПИ

В 1970 г. А.А. Оатул защитил докторскую диссертацию на тему «Теоретические и экспериментальные исследования сцепления с бетоном стержневой и канатной арматуры». В 1972 г. он был утвержден в ученом звании профессора.

После защиты докторской диссертации А.А. Оатул активно занимался совершенствованием учебного процесса, читал лекции, занимался методической работой и международной научной деятельностью, в которой переводчики ему были не нужны. Он был прекрасным лектором, очень много уделял внимания подготовке к лекционным занятиям, выводу формул, рисункам на доске, выпустил целый цикл пособий по курсу «Железобетонные конструкции». Студенты с большим удовольствием слушали его лекции.

С 1971 г. по инициативе и под руководством

А.А. Оатула на кафедре ЖБК получило развитие новое направление научных исследований, основанное на использовании численных методов моделирования объектов строительства. В частности, были разработаны основы расчета железобетонных конструкций методом конечных элементов (МКЭ) с учетом действительных свойств железобетона (прочности, пластичности, трещиностойкости, законов сцепления арматуры с бетоном).

В 1976 г. за большие заслуги в развитии высшего строительного образования профессор А.А. Оатул был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В 1976 г. по рекомендации Минвуза СССР А.А. Оатул участвовал в работе международного конгресса по пространственным конструкциям в г. Монреаль (Канада). В 1977 г. он выезжал на стажировку в Румынию в г. Бухарест по обмену опытом в организации преподавательской и научной деятельности. В конце 1980 г. состоялась его трехмесячная научная стажировка по исследованию железобетонных конструкций в Англии. По результатам этих зарубежных командировок профессор А.А. Оатул делал сообщения, сопровождаемые слайд-фильмами, перед преподавателями и студентами с приглашением представителей строительной научно-инженерной общественности г. Челябинска. Его международная деятельность оказала существенное влияние на развитие научных исследований кафедры ЖБК, положительным образом повлияла на подготовку инженерных и научно-педагогических кадров.

В сентябре 1978 г. в Челябинске в ЧПИ по инициативе кафедры ЖБК была организована и состоялась Всесоюзная научно-техническая конференция по проблемам применения численных методов в расчетах и исследованиях железобетонных конструкций.

Профессор А.А. Оатул принимал активное участие в работе национальных групп Европейского комитета по бетону (ЕКБ), Международной ассоциации по пространственным конструкциям (ИАСС), координационного Совета по бетону и железобетону Госстроя СССР. В 1985 г. он был удостоен звания «Заслуженный строитель Российской Федерации», а в 1995 г. он был избран почетным членом Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН).

После продолжительной болезни 14 августа 1996 г. профессор А.А. Оатул ушел из жизни, оставив работоспособный творческий коллектив преподавателей и ученых. Достоинно продолжают дело отца его дочери: Ольга Александровна Оатул – канд. техн. наук, доцент кафедры информатики ЮУрГУ и Елена Александровна Мартынова – профессор, докт. педагогических наук, декан Челябинского госуниверситета.

В 1986–1997 гг. кафедрой ЖБК заведовал Юлий Алексеевич Ивашенко – один из первых аспирантов профессора А.А. Оатула. Ю.А. Ива-

шенко в 1989 г. защитил докторскую диссертацию, внося свой вклад в развитие теории железобетона, в частности, в изучение процессов деформирования и разрушения конструкций при переменных скоростях нагружения, в оценку податливости узлов соединения железобетонных элементов, в разработку модели расчета статически неопределимых систем для повышения эффективности сборно-монолитных конструкций. Тема его докторской диссертации – «Безригельная конструкция одно- и многоэтажных зданий». Ю.А. Ивашенко в 1991 г. был утвержден в ученом звании профессора кафедры ЖБК.

В 1993 г. в связи с проводимыми реформами в высшем образовании России был резко сокращен прием студентов в вузы страны, в том числе, и в Челябинский государственный технический университет (ЧГТУ) на обучение за счет средств федерального бюджета. Учебная нагрузка преподавателей кафедры сократилась почти в 2 раза. В 1997 г. ученый Совет ЧГТУ принял решение объединить кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» и «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» в одну кафедру с новым названием – «Строительные конструкции и инженерные сооружения» (СКИИС). Наряду с подготовкой инженеров по специальности «Промышленное и гражданское строительство», с 1997 г. кафедра СКИИС ведет подготовку инженеров путей сообщения по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» и бакалавров по направлению «Строительство». Заведует кафедрой с 1997 г. профессор, канд. техн. наук Ю.В. Максимов.

Преподаватели и сотрудники кафедры, выполняя заказы предприятий и организаций, участвуют в работах по технической экспертизе строительных проектов, по обследованию объектов, разработке рекомендаций по выводу из аварийного состояния зданий и сооружений, выполняют научные проекты по грантам Министерства образования и науки РФ и межвузовским научным программам раздела «Строительство и архитектура».

Вся предшествующая научная деятельность кафедры, сформированная под руководством профессора А.А. Оатула, во многом предопределила становление и успешное внедрение в учебный процесс новых дисциплин – «Основы МКЭ», «Численные методы в инженерных расчетах», «Основы САПР строительных конструкций», «Основы автоматизированного проектирования», позволяющих вести подготовку специалистов на уровне современных требований строительной науки и производства. Кафедра СКИИС стала инициатором применения компьютерных технологий в проектировании строительных конструкций и конструктивных схем зданий в Челябинске и области. Накопленный опыт позволил коллективу кафедры в последующем выполнять научные и практические работы по расчету и конструированию различных объектов: реконструкции главного

учебного корпуса Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ), 25-этажного офисного здания и ряда 16-этажных зданий в г. Челябинске, покрытия здания ледового дворца «Уральская молния», библиотеки в г. Оренбурге, стальных и железобетонных труб в Свердловской, Пермской и Челябинской областях и многих других объектов.

С 1997 по 2003 гг. кафедра СКИИС участвовала в большой, важной и трудоемкой работе по обновлению архитектурного облика главного учебного корпуса ЮУрГУ с превращением семизэтажного здания в уникальное классическое университетское здание с надстройкой четырех этажей с башней и шпилем (восстановление первоначального проектного облика).

В учебном пособии, изданном в 2004 г. в Издательстве ЮУрГУ к 90-летию профессора А.С. Черного, «Возведение большепролетной преднапряженной сборно-монолитной оболочки торгового центра в г. Челябинске» под ред. Ю.В. Максимова изложены опыт конструирования, организации строительно-монтажных работ, научное сопровождение технологии обжатия контура оболочки с помощью канатной арматуры и раскруживания. Уникальная железобетонная оболочка перекрывает торговый зал площадью более одного гектара без промежуточных опор и эксплуатируется уже более 30 лет.

А.А. Карякин – автор уникального издания «Расчет конструкций, зданий и сооружений с использованием персональных ЭВМ», которое рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов России в области строительного образования в качестве учебного пособия.

В 2002 г. защитил докторскую диссертацию В.Ф. Сабуров на тему: «Закономерности усталостных повреждений и разработка метода расчетной оценки долговечности подкрановых путей производственных зданий». В 2005 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре СКИИС.

Преподаватели В.Ф. Сабуров, А.Ф. Кузнецов, И.В. Сидоров являются соавторами учебника «Металлические конструкции» в 3-х томах для студентов строительных специальностей вузов, который трижды издан в издательстве «Высшая школа» в 1997–2005 гг. под редакцией чл.-кор. РААСН В.В. Горева.

Сотрудники кафедры СКИИС Р.Г. Губайдулин и А.К. Тиньгаев участвовали в разработке СП 53-101-98 «Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций», ГОСТа 23118–99 «Конструкции стальные строительные. Общетеchnические условия». Профессор докт. техн. наук Р.Г. Губайдулин – член научно-технического совета ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова.

Группа единомышленников под руководством профессора, докт. техн. наук, лауреата премии Совета Министров СССР В.М. Асташкина продолжа-

ет исследования и внедрение стеклопластиковых изделий для предприятий с сильно агрессивными средами (дымовые трубы, газоходы, емкости и т.п.). В 2007 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию аспирант М.В. Мишнев на тему «Сэндвичевые стеклопластиковые оболочки с наполнителем из минераловатных плит».

Работа кафедры продолжается в рамках научно-промышленного консорциума «Ресурс», председателем которого избран в 2001 г. докт. техн. наук В.М. Горицкий (ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова). ЮУрГУ в нем представляет докт. техн. наук, профессор В.Ф. Сабуров. В 2001 г. в ЮУрГУ был проведен семинар-совещание «Проблемы эксплуатации и оценка технического состояния строительных промышленных фондов, отработавших установленные сроки». В 2005 году – научно-практическая конференция «Исследования, расчет, проектирование и безопасная эксплуатация строительных конструкций зданий и сооружений».

Анализируя итоги научной деятельности строительной школы конструкторов на Южном Урале, следует отметить, что в коллективной работе есть дирижеры и солисты, как в большом оркестре. Для коллектива кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» это были первые руководители аспирантур:

Оатул А.А. – организатор и создатель обстановки научного творчества, экспериментальной базы технической теории сцепления арматуры с бетоном и основ расчета строительных конструкций с применением МКЭ с учетом их действительных свойств;

Абаринов А.А. – основатель школы металлостроительства на Южном Урале, ведущий конструктор и технолог России в области проектирования и изготовления металлических конструкций;

Кузнецов А.Ф. – достойный ученик школы Н.С. Стрелецкого, первопроходец исследований влияния технологических процессов на экономическую эффективность металлических строительных конструкций;

Сюндюков Г.М. – основатель исследования инженерно-геологической обстановки в регионе и применения свайных фундаментов, разработчик рекомендаций по восстановлению работоспособности оснований и фундаментов зданий и сооружений.

Под их руководством выросла плеяда преподавателей и исследователей, среди них доктора технических наук, профессора: В.М. Асташкин, Р.Г. Губайдулин, Ю.А. Ивашенко, В.Ф. Сабуров, которые продолжают и развивают научный потенциал южно-уральской школы конструкторов-строителей, учат студентов, руководят подготовкой аспирантов, активно работают в Советах по защите докторских и кандидатских диссертаций в Челябинске, Магнитогорске, Екатеринбурге, Оренбурге.

Градостроительство и архитектура

УДК 711.73+711.7

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В г. ЧЕЛЯБИНСКЕ

М.А. Сибрикова

Описаны результаты обследования движения городского транспорта, проведенного в июле 2007 года в составе натурных обследований для Комплексной Транспортной Схемы г. Челябинска. Выявлены закономерности движения транспортных потоков и их структура. Определены наиболее проблемные участки транспортной системы.

Целью настоящего исследования было выявление реальных объемов движения транспорта и особенностей их пространственного распределения. Проведение такого исследования продиктовано необходимостью создания информационной базы о состоянии транспортной системы, как для управления ею, так и для прогнозирования ее развития. Исследования характера движения транспортных потоков проводились в рамках комплексного обследования для Комплексной Транспортной Схемы (КТС) г. Челябинска в июле 2007 г. Структура комплексного транспортного обследования представлена на рис. 1.

Основными задачами, которые ставились перед обследованием, были:

- определение суточных размеров движения транспортных потоков;
- определение структуры транспортного потока;
- выявление времени и доли часа пик;
- определение динамики транспортных потоков для основных узлов;
- построение картограммы интенсивности движения на улично-дорожной сети (УДС) г. Челябинска;
- оценка резерва пропускной способности УДС.

Натурные обследования интенсивности движения проводились в июле 2007 г. в соответствии со стандартными методиками [1] как на перегонах, так и в узлах УДС в заранее определенных экспертным методом местах. Всего было обследовано 20 перегонов и 107 узлов транспортной сети. Схема размещения обследованных узлов УДС представлена на рис. 2. По итогам натурных обследований был определен час пик по каждому узлу магистральной сети, а также величина максимальной интенсивности движения в приведенных единицах. Коэффициенты приведения к расчетному автомобилю принимались в соответствии со СНиП 2.05.02–85* «Автомобильные дороги» [2].

Обследование интенсивности движения транспорта на перегонах проводилось также с целью выявления часа пик в наиболее характерных сечениях магистральной сети и на внешних выходах с территории г. Челябинска – на Свердловском, Копейском, Бродокалмакском и Троицком трактах (шоссе).

Закономерности интенсивности движения транспорта на перегонах:

– Основное движение по обследованным сечениям осуществляется в период с 7:00 до 21:00.

– На выходах на сеть внешних автодорог можно условно выделить утренний и вечерний час пик (утренний 9:30 – 10:30, вечерний 17:30 – 18:30).

– На обследованных сечениях, расположенных в пределах УДС города однозначно час пик выделить не удалось. Скорее можно говорить об утреннем и вечернем периодах перегрузки сети.

– Максимальная интенсивность движения в одном направлении составляет 2724 прив. авт./ч (ул. Труда на участке «Родничок» – ул. Энгельса).

– В среднем по обследованным сечениям доля часа пик составила 0,121.

– В среднем по обследованным сечениям коэффициент часовой неравномерности составил 1,3066.

Обследование интенсивности движения транспорта на перекрестках проводилось с целью выявления наиболее загруженных узлов магистральной сети. Всего было обследовано 107 пересечений магистральной сети. Из них 17 пересечений были обследованы утром и вечером, 49 пересечений утром, 41 пересечение вечером. Утренние обследования, как правило, проводились с 8:00 до 11:30, вечерние – с 15:00 до 19:00.

Закономерности интенсивности движения транспорта на пересечениях:

– Основное движение по обследованным сечениям осуществляется в период с 7:00 до 21:00.

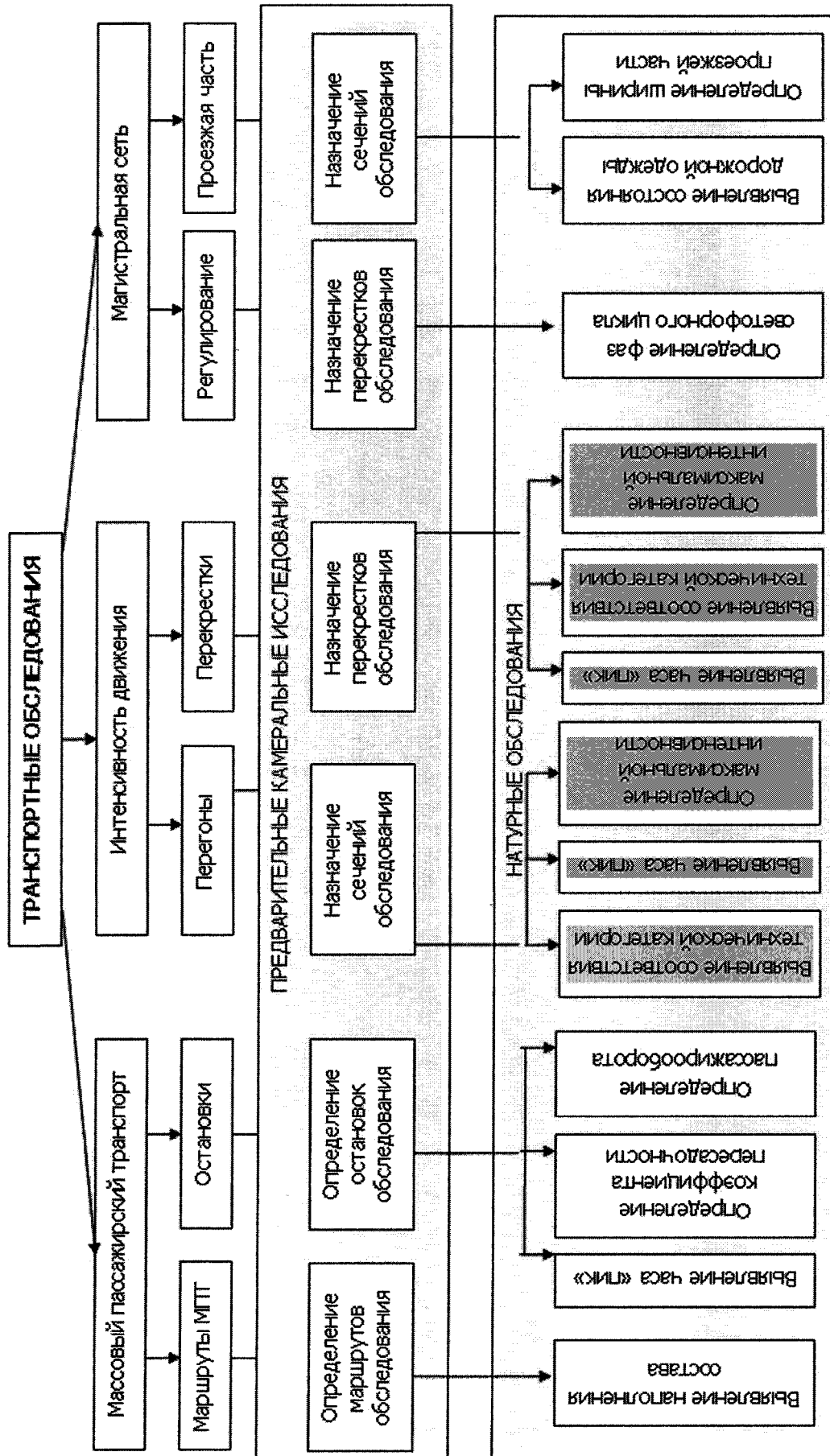


Рис. 1. Структура транспортных обследований

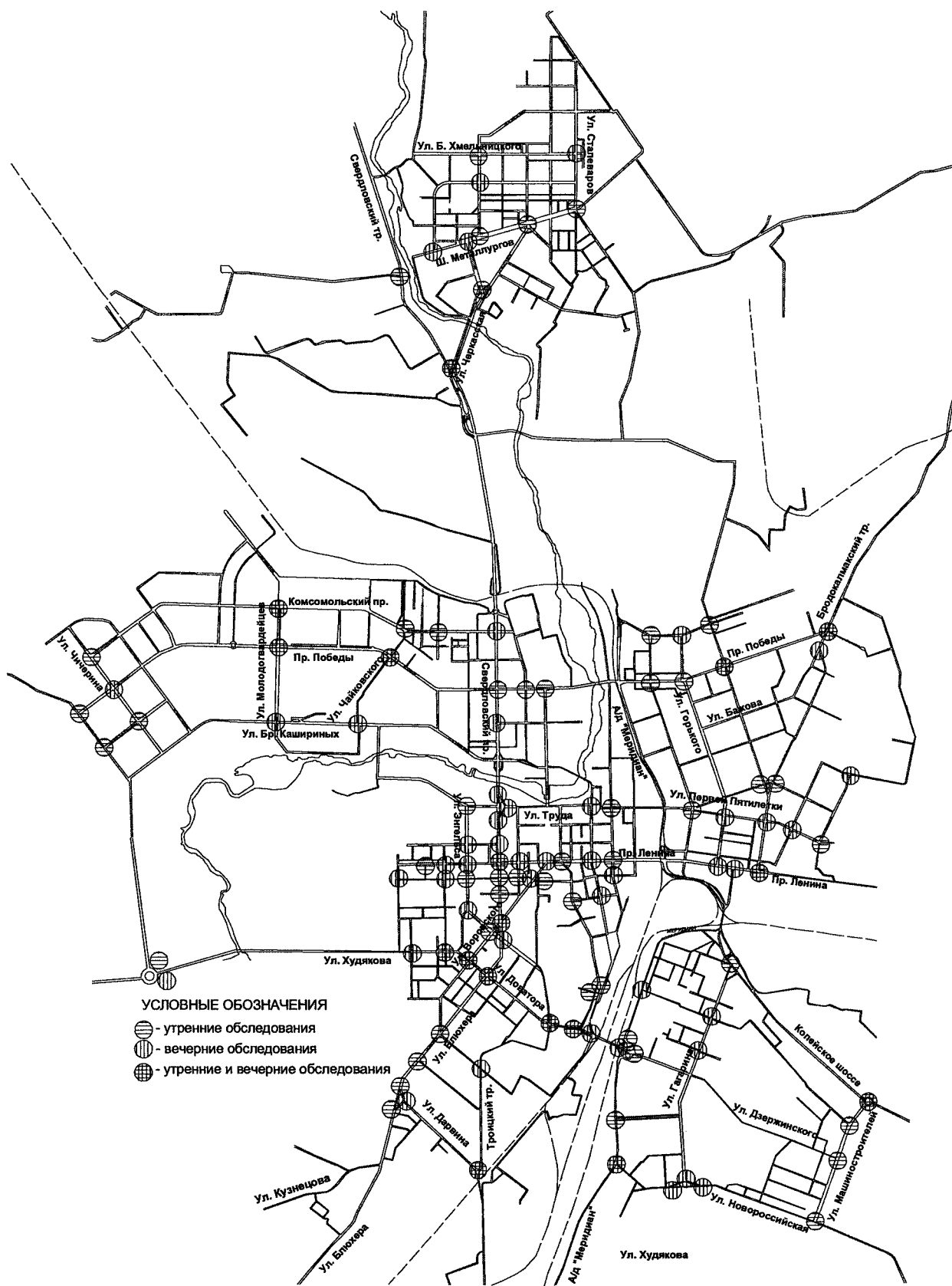


Рис. 2. Схема размещения узлов обследования

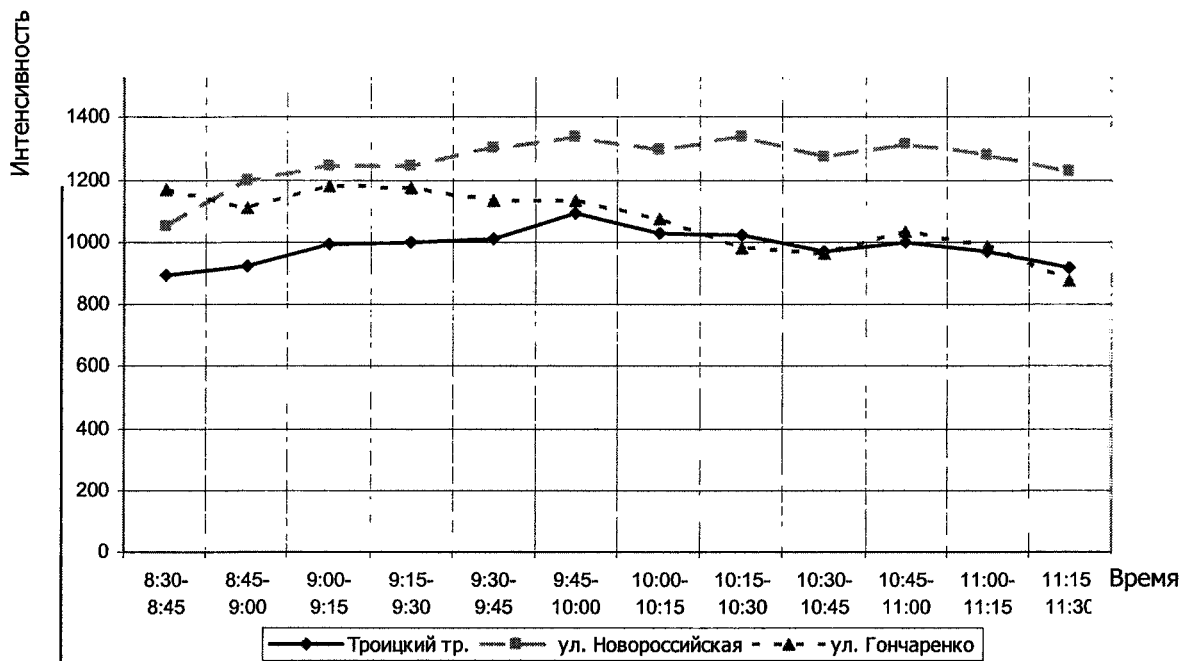


Рис. 3. Динамика загрузки транспортных узлов на пересечении с а/д «Меридиан»

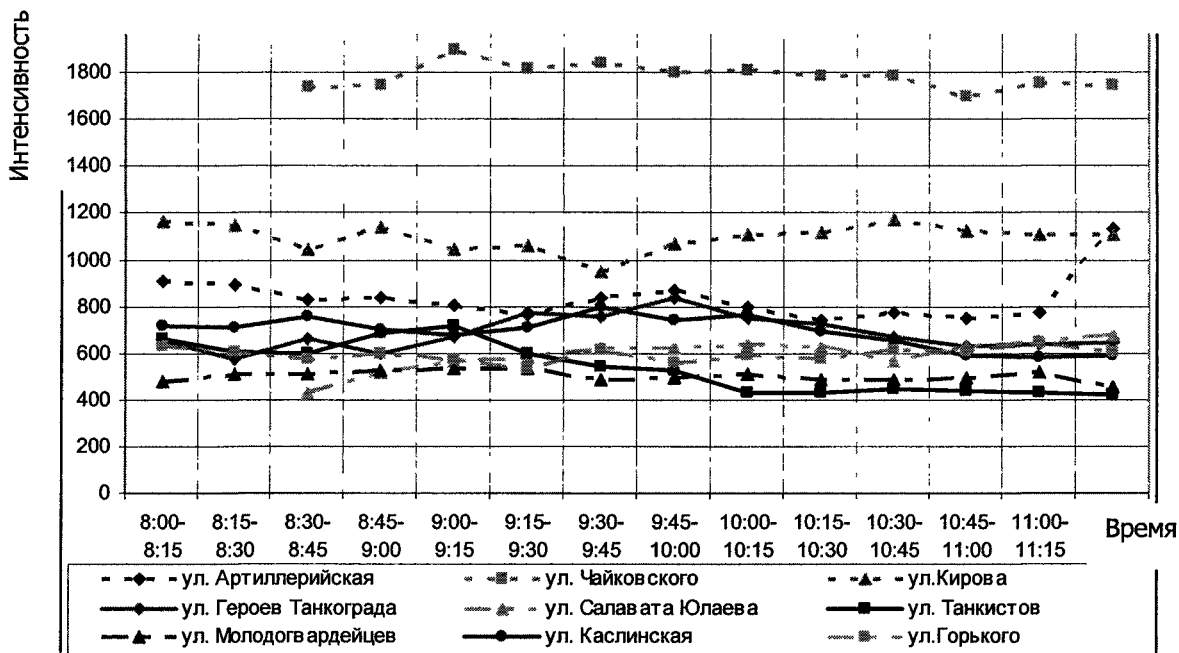


Рис. 4. Динамика загрузки транспортных узлов на пересечении с пр. Победы

– Загрузка пересечений зависит от их пространственного положения, а диапазон ее изменения – от функционального значения магистрали. Так для магистралей общегородского значения он колеблется от 2149 до 8659 прив. авт./ч, а для магистралей районного значения от 1067 до 5538 прив. авт./ч.

– Загрузка узлов в утренние и вечерние часы относительно одинакова и составляет в среднем для магистралей общегородского в утренний час пик

4325 прив. авт./ч, а в вечерний – 4658 прив. авт./ч. Для магистралей районного значения она составит соответственно 3408 прив. авт./ч и 3141 прив. авт./ч.

– На магистралях районного значения представилось возможным условно выделить утренний час пик с 8:30 до 9:30. На магистралях общегородского значения транспортные узлы находятся в условиях стабильной загрузки с 8:30 до 10:30. В вечерний период час пик выделить не удалось.

– В среднем по обследованным пересечениям

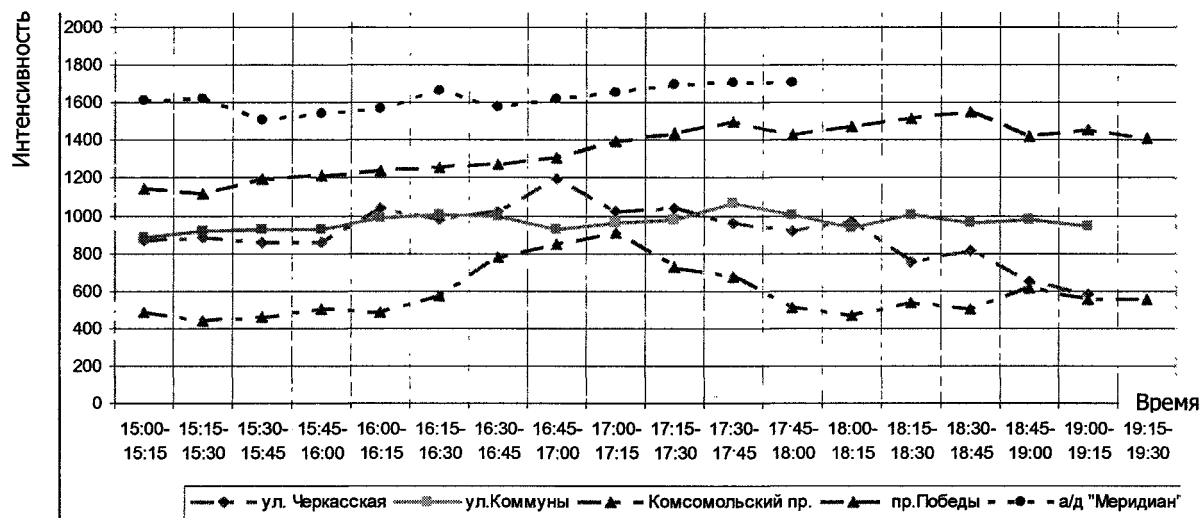


Рис. 5. Динамика загрузки транспортных узлов на пересечении со Свердловским пр.

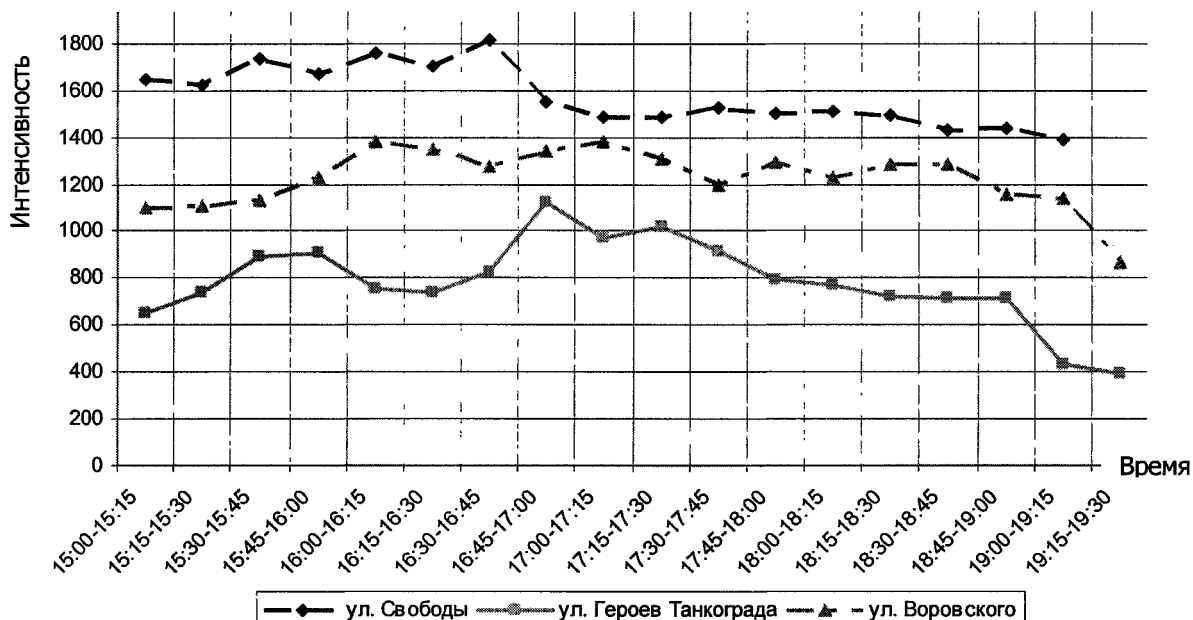


Рис. 6. Динамика загрузки транспортных узлов на пересечении с пр. им. В.И. Ленина

коэффициент часовой неравномерности составил для общегородских магистралей 1,0817, а для магистралей районного значения – 1,0974.

– Динамика загрузки узлов в пределах магистрали практически постоянна (рис. 3, 4). Исключения представляют транспортные узлы, принимающие нагрузку из планировочных районов (рис. 5, 6).

Литература

1. СНиП 2.05.02–85. Автомобильные дороги / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
2. Руководство по проведению транспортных обследований в городах / БелНИИПГрадостроительства. – Минск, 1978. – 192 с.

Строительные материалы, изделия и конструкции

УДК 666.962.2

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЗАТВОРИТЕЛЕЙ НА ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ МАГНЕЗИАЛЬНОГО КАМНЯ

В.В. Зимич, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов

Представлены результаты экспериментальных исследований гигроскопичности магнезиального камня с использованием различных затворителей. Показано, что применение в качестве затворителя побочного продукта производства изопропилового спирта позволяет значительно снизить гигроскопичность камня.

В настоящее время увеличивается спрос на стеновые теплоизоляционные материалы, что требует расширения номенклатуры и выпуска изделий с высокими показателями прочности при сжатии и изгибе, водостойкости и низкими гигроскопичностью и теплопроводностью. Для этих целей можно использовать магнезиальные материалы, такие как ксилолит, фибролит, гераклит и др. Основными причинами, сдерживающими их применение, является высокая гигроскопичность камня, полученного затворением водным раствором хлорида магния.

Известно, что особое влияние на формирование структуры и свойств магнезиального камня оказывает вид затворителя [1, 5]. Для получения строительных материалов с разными специфическими свойствами в качестве затворителей используют водные растворы хлорида магния, сульфатов магния и железа и др.

Наибольшее распространение среди затворителей получил бишофит технический (водный раствор хлорида магния). Магнезиальный камень на его основе отличается высокой прочностью при сжатии, достигающей в возрасте 28 суток 60 МПа и быстрым набором прочности в ранние сроки твердения. Но этот материал отличается повышенной гигроскопичностью, которая достигает 7...8 %, поэтому его нельзя применять в производстве теплоизоляционных материалов.

В работах А.М. Кузнецова и В.В. Шелягина [3, 4] было отмечено, что использование в качестве затворителя водного раствора хлорида магния в производстве фибролитовых плит, отделочных материалов, несъемной опалубки в труднопроизводимых местах наблюдается насыщение этих материалов влагой. Это является причиной появления сырости, высолов и грибка на поверхности изделий и поштукатурке, а в суровых климатических условиях возможно промерзание стен, что и

явилось причиной отказа от данного вида затворителя при производстве теплоизоляционных и отделочных материалов.

Целью настоящего исследования является разработка магнезиальных материалов с низкой гигроскопичностью.

Разные учёные предлагают следующие пути снижения гигроскопичности магнезиальных материалов:

А.М. Кузнецов [3] для достижения поставленной цели предлагал введение в состав хлормагнезиального вяжущего добавки сульфата железа, которая в процессе гидратации при взаимодействии с хлоридом магния образует сульфат магния и тем самым снижает гигроскопичность получаемого материала. Но такой способ не нашёл широкого применения из-за значительного снижения прочности изделий.

Есть предложения затворять магнезиальное вяжущее смешанным хлорсульфатным затворителем.

Элинз М.П., Келессо [1, 2, 5] установили, что наибольшее снижение гигроскопичности магнезиального камня возможно при использовании в качестве затворителя сульфата магния.

Для выявления наиболее эффективного способа снижения гигроскопичности были проведены исследования магнезиального камня с использованием смешанного хлорсульфатного и сульфатного затворителей.

Изучение влияния хлорсульфатного затворителя на гигроскопичность магнезиального камня проводили на смеси водных растворов хлорида и сульфата магния в следующем процентном соотношении:

$MgSO_4 \div MgCl_2 - 25 \div 75; 50 \div 50; 75 \div 25,$
при этом принимали плотность

$MgSO_4 \cdot 7H_2O - 1,18 \text{ г/см}^3, MgCl_2 \cdot 6H_2O - 1,20 \text{ г/см}^3.$
В качестве магнезиального вяжущего использова-

Строительные материалы, изделия и конструкции

ли ПМК-75 (ОАО «Комбинат «Магнезит», г. Сатка), удовлетворяющий ГОСТ 1216-87, с насыпной плотностью в вибрированном состоянии 1320 г/дм³ и содержанием пережога 2,5 %. В табл. 1 приведены результаты испытаний полученных образцов.

Анализ полученных результатов исследования показал следующее: прочность камня, полученного затворением магнезиального вяжущего хлорсульфатным затворителем, в возрасте 28 суток имеет максимальное значение на затворителях с соотношением $MgSO_4 \div MgCl_2 = 25 \div 75$ и $50 \div 50$ и составляет 47...41 МПа. Дальнейшее повышение доли сульфата магния в затворителе приводит к резкому снижению прочности камня до 28 МПа.

Гигроскопичность полученных образцов изменяется от 5,5 до 3,8 %, в зависимости от содержания сульфата магния, что в полной мере не решает проблему.

Водопоглощение камня с увеличением концентрации сульфата магния снижается с 8,2 до 5,5 %. При соотношении составляющих затворителя $MgSO_4 \div MgCl_2 = 25 \div 75$ коэффициент размягчения составляет 0,64, а дальнейшее увеличение доли сульфата снижает его до 0,4.

Таким образом, использование смешанного хлорсульфатного затворителя является не рациональным и не достаточно эффективно решает проблему гигроскопичности, водостойкости и прочности.

Вторым путём снижения гигроскопичности магнезиального камня является использование в качестве затворителя водного раствора сульфата магния. Полученные результаты испытаний сульфомагнезиального камня при твердении сведены в табл. 2.

Из полученных результатов следует, что в марочном возрасте прочность магнезиального камня,

затворённого водным раствором сульфата магния низкой плотности 1,14...1,16 г/см³, не превышает 20 МПа, при больших плотностях затворителя (1,18...1,22 г/см³) она составляет 24...32 МПа, при этом наблюдается повышение коэффициента размягчения магнезиального камня от 0,4 до 0,67. Водопоглощение также зависит от плотности затворителя и достигает при высоких плотностях наименьшего значения – 2,4 %. Такая же зависимость наблюдается при оценке гигроскопичности магнезиального камня, которая с повышением плотности затворителя от 1,14 до 1,22 г/см³ изменяется от 3,4 до 1,06 %.

Таким образом, проблему гигроскопичности можно успешно решить ранее известным способом – использованием в качестве затворителя сульфата магния. Но при этом плотность водного раствора сульфата магния должна быть выше 1,18 г/см³.

В отдельных работах предлагается использовать в качестве затворителя различных отходов производств, содержащих слабоконцентрированную серную кислоту и др. сульфатосодержащие отходы.

К такому виду затворителя можно отнести продукт (ПОС) по ТУ 2141-003-46754744-07, получаемый путём нейтрализации серной кислоты серпентинитом магнезитом в производстве изопропилового спирта, содержащий до 70 % $MgSO_4$. ПОС растворяется водой до получения плотности затворителя 1,31 г/см³. В результате растворения этого отхода образуется суспензия, содержащая 30...50 % силикатного геля. Эффективность этого материала изучали с применением гелевой составляющей и без неё. Результаты испытаний сведены в табл. 3.

Таблица 1
Изменения физико-механических характеристик магнезиального камня, затворённого смесью хлорсульфатов магния

Соотношение $MgSO_4 \div MgCl_2$	Гигроскопичность, % по массе	Водопоглощение, % по массе	Коэффициент размягчения	Прочность при сжатии в 28 суток, МПа
25 ÷ 75	5,45	8,2	0,64	47,2
50 ÷ 50	4,44	7,9	0,65	40,9
75 ÷ 25	3,8	5,5	0,4	28

Таблица 2
Изменения физико-механических характеристик магнезиального камня, затворённого водным раствором сульфата магния $MgSO_4$ различной плотности

Плотность водного раствора сульфата магния	Гигроскопичность, % по массе	Водопоглощение, % по массе	Коэффициент размягчения	Прочность при сжатии в 28 суток, МПа
$\rho = 1,14$ г/см ³	3,4	6,7	0,4	17,5
$\rho = 1,16$ г/см ³	3,0	5,6	0,4	20,8
$\rho = 1,18$ г/см ³	1,27	4,8	0,55	24,4
$\rho = 1,20$ г/см ³	1,08	2,9	0,65	28,4
$\rho = 1,22$ г/см ³	1,06	2,4	0,67	32,7

Таблица 3

Изменения физико-механических характеристик магнезиального камня,
затворённого раствором/рассолом ПОС

Плотность ПОС	Гигроскопичность, % по массе	Водопоглощение, % по массе	Коэффициент размягчения	Прочность при сжатии в 28 сутки, МПа
Раствор ПОС (с гелем)	0,94	2,04	0,73	30,1
Рассол ПОС (без геля)	1,07	1,3	0,7	30,6

Из данных табл. 3 видно, прочность камня, полученного затворением магнезиального вяжущего водным раствором (с гелем) и рассолом (без геля), составляет 30 МПа. Коэффициент размягчения камня на рассоле ПОС достигает 0,7, а камня на растворе ПОС – 0,73. При этом водопоглощение камня на растворе ПОС выше, чем на его рассоле, и составляет 2,04 %, а гигроскопичность этих камней находится в пределах 1 %.

Следовательно, использование ПОС без геля менее эффективно, т. к не приводит к повышению физико-механических характеристик камня, а отделение гелевой фазы затворителя повышает затраты на работу непосредственно в производстве и увеличивает расход ПОС в 2 раза.

Использование в качестве затворителя отхода производства изопропилового спирта позволяет получать магнезиальный камень низкой гигроскопичности, а также приводит к снижению водопоглощения в 2 раза и повышению коэффициента размягчения с 0,55...0,67 до 0,73 в сравнении с сульфатом магния.

Проведённые исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование водного раствора смешанного хлорсульфата магния в качестве затворителя магнезиального вяжущего не эффективно, так как гигроскопичность камня в сравнении с хлормagneзиальным снижается не значительно, но при этом повышается расход солей-затворителей.

2. Применение затворителя – сульфата магния позволяет решить проблему гигроскопичности.

3. Наиболее эффективным решением проблемы гигроскопичности является получение теплоизоляционных материалов с использованием в качестве затворителя побочного продукта производства изопропилового спирта.

4. Изделия на основе магнезиального камня на этом затворителе отличаются наименьшей гигроскопичностью, не превышающей 1%, высоким показателем коэффициента размягчения (водостойкости) и достаточной прочностью.

5. Использование в качестве затворителя отхода производства ПОС (ОАО «Оренбургские материалы») позволяет решать проблему безотходности на данном предприятии.

Литература

1. Адомавичутте, О.Б. О твердении магнезиального цемента / О.Б. Адомавичутте, И.В. Яницкий, Б.И. Вектарис // Тр. АН ЛитССР. – 1967. – Сер. Б2(25). – С. 2551–2554.

2. Козлова, В.К. Фазовый состав водостойкого магнезиального камня / В.К. Козлова, Т.Ф. Свит, М.Н. Гришина // Резервы производства строительных материалов. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – Ч. 1. – С. 27–31.

3. Кузнецов, А.М. Производство каустического магнезита / А.М. Кузнецов. – М., 1948. – 210 с.

4. Шелягин, В.В. Магнезиальный цемент (сырье, технология получения и свойства) / В.В. Шелягин. – М.–Л.: Госстройиздат, 1933. – 107 с.

5. Элинз, М.П. Цемент Сореля и соли / М.П. Элинз // Строительные материалы. – 1937. – № 1. – С. 30.

О ДОПУСКЕ НА РАЗМЕРЫ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

А.Х. Байбурин, С.В. Никоноров

Приводятся результаты натурных исследований точности процессов возведения монолитных конструкций по геометрическим параметрам. Предлагаются нормативные допуски на отклонения размеров поперечного сечения монолитных конструкций.

Актуальной задачей строительного нормирования является сбор и обобщение данных о достигаемой точности процессов возведения монолитных конструкций гражданских зданий с учетом современного развития строительной техники и технологии

На основе массива статистических данных, полученных в результате исследований 10 монолитных зданий [1], проанализируем фактические отклонения геометрических параметров элементов и сравним их с требованиями СНиП 3.03.01–87 [2] на отклонение размеров поперечного сечения: от –3 до 6 мм. Значительные положительные систематические отклонения, наблюдаемые для размеров поперечных сечений элементов монолитных конструкций, обуславливаются, в основном, недостатками технологии бетонирования и применяемой опалубки. Сравнивая фактические значения отклонений с нормативными допусками и данными исследований Ю.Г. Хаютина [3], можно судить о неоправданно жестких допусках на размеры сечений монолитных конструкций (таблица).

Установлено, что геометрические отклонения превышают нормативный допуск и смещены в сторону положительных значений от номинальных размеров в результате эффекта распора от давления бетонной смеси и прогиба опалубки перекрытий. Среднее значение отклонения этого параметра составляет 6,65 мм, стандартное отклонение – 6,68 мм, что превышает нормативные значения в 3–4 раза.

Нормами [2] установлены допуски на отклонение от вертикали монолитных конструкций

10–20 мм, от горизонтали – 20 мм, на местные неровности – 5 мм и перепады в стыках смежных поверхностей – 3 мм. Точность установки опалубки должна составлять $\pm T/16/2$ по ГОСТ 25346, что соответствует ± 7 мм при высоте этажа 2,5 м и более. Исходя из этих величин, существующий допуск на размер поперечного сечения, по нашему мнению, недостаточно обоснован. Ю.Г. Хаютин предлагает расширить допуск на отклонение поперечного сечения монолитных конструкций до (–8...+16) мм. В нормах США допуск на этот параметр составляет (–6...+12) мм.

Предлагаются нормативные допуски на отклонения размеров поперечного сечения монолитных конструкций, которые обеспечивают выполнение нормативных требований при существующем уровне технологии бетонных работ: при размерах поперечного сечения до 250 мм – (–4...+12) мм; от 250 до 500 мм – (–5...+15) мм; свыше 500 мм – (–6...+18) мм. При обосновании предложенных допусков были проведены исследования:

- 1) статистической управляемости и пригодности технологических процессов по ГОСТ Р серии 50779;
- 2) точности монтажа сборных конструкций, используемых в сборно-монолитных зданиях;
- 3) влияния новых допусков на надежность элементов конструкций.

Для решения первой задачи строились контрольные карты Шухарта по ГОСТ Р 50779.40–96 (рис. 1), гистограммы с контрольными границами (рис. 2) и вычислялись индексы пригодности по

Таблица

Контролируемый параметр	Допуск	Среднее значение / стандартное отклонение, мм	
		По данным авторов	По данным [3]
Размеры сечений фундаментов	+6 –3	9,0 / 22,7	15,7 / 22,3
Размеры сечений стен и колонн	+6 –3	9,4 / 6,4	9,4 / 32,6
Толщина плит перекрытий	+6 –3	5,6 / 6,1	6,1 / 14,7
Размеры сечения балок и ригелей	+6 –3	20,7 / 22,4	4,8 / 70,7
Отклонение стен и колонн от осей	10	0,2 / 5,4	–
Отклонение стен, колонн от вертикали	15	0,1 / 10,5	2,1 / 16,9

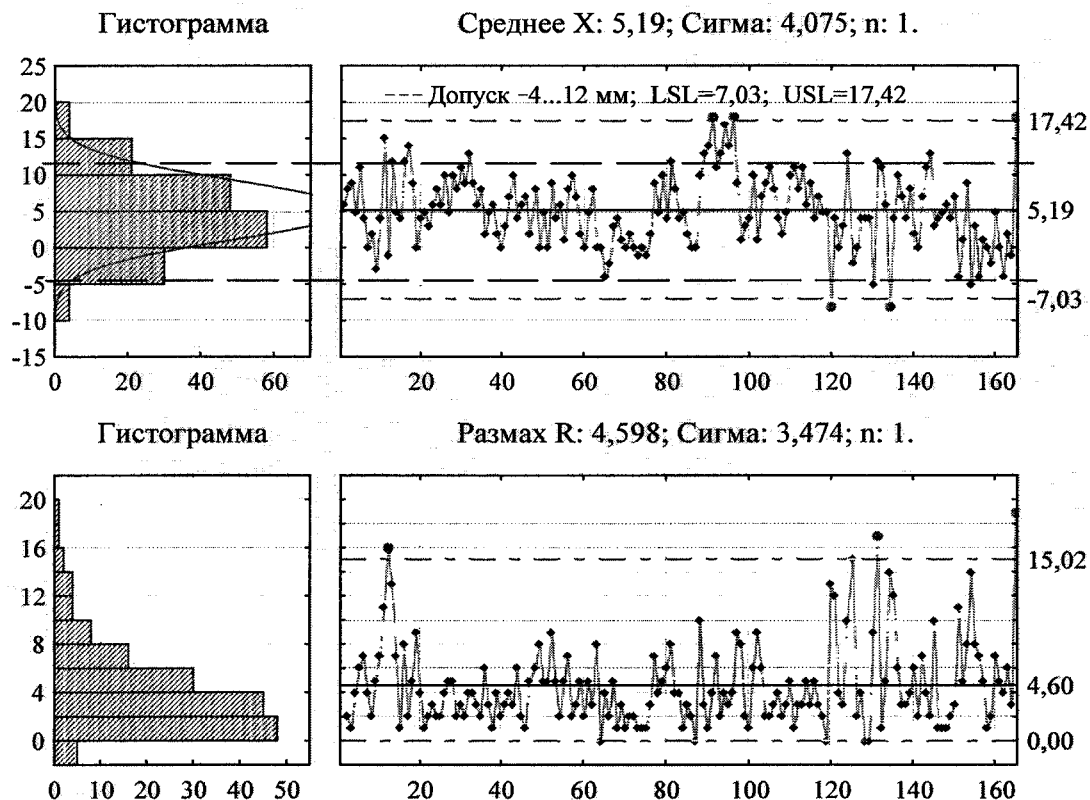


Рис. 1. Контрольная карта толщины плит перекрытий

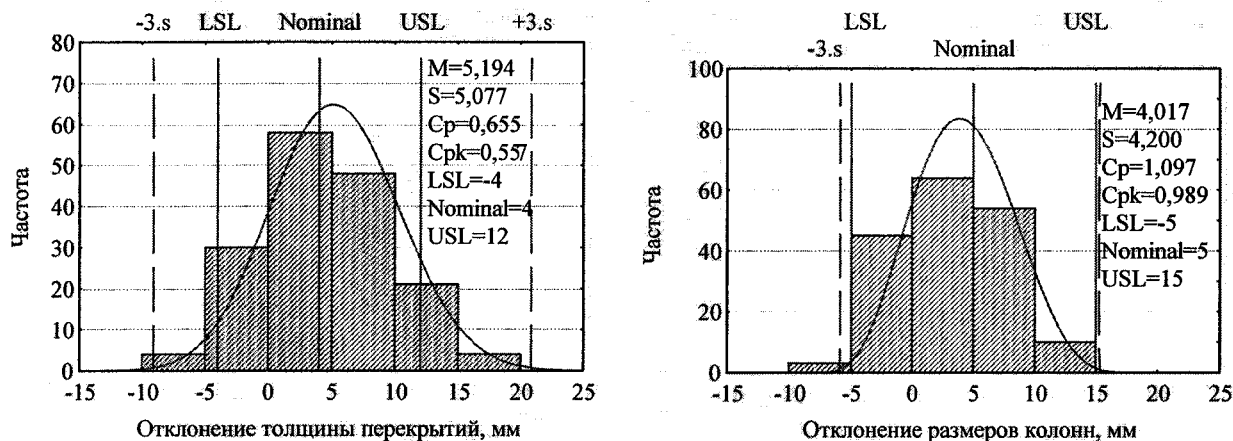


Рис. 2. Гистограммы с контрольными границами, равными новому допуску

ГОСТ 50779.44–2001 для отклонений поперечных сечений колонн, стен и плит перекрытий. Из полученных данных следует, что процессы управляемы по геометрическим параметрам (значения практически не выходят за верхнюю USL и нижнюю LSL контрольные границы, распределение параметров близко к нормальному). Следовательно, снизить уровень несоответствия нормам возможно либо коренным изменением процесса (совершенствование опалубки, технологии), либо пересмотром допусков.

Как видно из рис. 2, предлагаемые допуски обеспечивают приемлемую пригодность и качество процессов устройства монолитных перекрытий, колонн и стен.

Расчеты точности монтажа сборных конструкций, используемых в сборно-монолитных зданиях, выполнялись в соответствии с ГОСТ 21778, 21780, 23615, 23616 и рекомендациями по расчету точности сборки конструкций зданий [4]. Расчеты показали, что технологический допуск увеличивается на 5–8 %, что необходимо учитывать при рас-

чете функциональных допусков. Уровень собираемости сборных конструкций (лестничных площадок, диафрагм жесткости) при классе точности V и функциональном допуске 40 мм не изменяется.

По оценкам [5] снижение несущей способности железобетонных элементов при суммарном учете неблагоприятного влияния допусков может достигать 27–36 %. Так как вариация несущей способности конструкции зависит от допусков (изменчивости параметров), рассчитывалось влияние предлагаемого допуска на надежность конструкций колонн, стен, диафрагм и перекрытий. При увеличении допусков расчетная вероятность отказа конструкций повышается, но незначительно, в 1,05–1,24 раза (по данным зарубежных исследований допускается до 2–10 раз).

Таким образом, увеличение допуска целесообразно и допустимо как с точки зрения статистического регулирования производства, так и с позиций согласованности с другими допусками, обеспечения точности монтажа и надежности возводимых конструкций.

Литература

1. Байбурин, А.Х. Качество возведения монолитных жилых домов / А.Х. Байбурин, С.В. Никоноров // *Жилищное строительство*. – 2002. – № 4. – С. 4–6.
2. СНиП 3.03.01–87. *Несущие и ограждающие конструкции* // ЦИТП Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 192 с.
3. Хаютин, Ю.Г. О допусках на геометрические размеры монолитных конструкций / Ю.Г. Хаютин // *Бетон и железобетон*. – 1986. – № 3. – С. 25–26.
4. *Рекомендации по расчету точности сборки конструкций зданий* // ЦНИИОМТП. – М.: Стройиздат, 1983. – 135 с.
5. Кузнецов, В.С. *Нормативные допуски как факторы риска снижения долговечности строительных объектов* / В.С. Кузнецов, А.В. Кузнецов, М.Н. Смирнов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. – 2005. – № 5. – С. 80–81.

Теория расчета строительных конструкций

УДК 624.014.001.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОКРЫТИЯ ЛЕДОВОГО ДВОРЦА В г. ЧЕЛЯБИНСКЕ

В.Ф. Сабуров, Ю.А. Ивашенко, Н.Б. Козьмин, Н.В. Гусева

В статье приведены методика и результаты экспериментального исследования модели, изготовленной в масштабе 1:10 реальной конструкции покрытия ледового дворца.

Крытый ледовый дворец «Уральская молния» представляет собой одноэтажное здание длиной 198 м, пролетом 84 м с консолями по 4,3 м. Его несущая конструкция – поперечная рама, образованная двухветвевыми колоннами и ригелем в виде пологого криволинейного бруса (арки), подкрепленного шпренгелем ломаного очертания. Арка покрытия состоит из прямолинейных сегментов длиной 8,4 м, соединенных между собой фланцами на высокопрочных болтах. Пролет арки $L_n = 83,4$ м; радиус нейтральной линии $R_n = 206\,700$ мм; стрела подъема арки $f = 4250$ мм. Общий вид конструкции покрытия с указанием сечения конструктивных элементов показан на рис. 1.

Данное конструктивное решение покрытий большепролетных зданий редко применяется в практике строительства. В России известны два объекта: покрытие малой спортивной арены в Лужниках пролетом 72 м [1]; покрытие Гостиного Двора с максимальным пролетом 80,74 м [2]. Из этого следует, что конструкция в виде пологой арки, подкрепленной ломаным шпренгелем, при всей простоте конструктивной формы является мало исследованной. Поскольку в технической литературе отсутствует методика расчета криволинейного бруса со шпренгелем как единой систе-

мы, а также не достаточно освещен вопрос о влиянии податливости болтовых соединений на прочность и устойчивость конструкции в целом, то для выявления действительной работы конструкции и оценки её пригодности к эксплуатации потребовалось провести экспериментальное исследование её модели.

Моделирование сечений арки и шпренгеля выполнено по методу приближенного геометрического подобия [3]. При моделировании принято, что коэффициент Пуассона и модуль упругости материала модели и натурной конструкции равны, перемещения модели и натурной идентичны, а относительные деформации в несущих элементах модели и натурной конструкции при упругой работе материала одинаковы. Фланцевые болтовые соединения при моделировании не учитывались. Масштаб геометрического подобия принят равным $m = 0,1$.

Таким образом, в соответствии с предпосылками, имеем индикаторы подобия:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_H} = 1; \mu_r = \frac{\mu_M}{\mu_H} = 1; E_r = \frac{E_M}{E_H} = 1.$$

Для определения относительной деформации ε_H выполнен расчет поперечного сечения арки натурной конструкции. Из условия прочности сечения

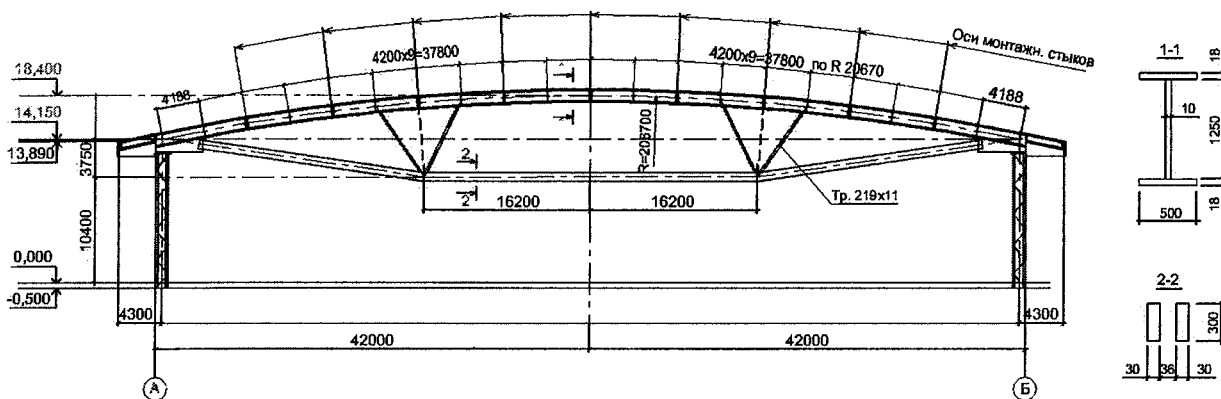


Рис. 1. Схема поперечной рамы крытого ледового дворца

Теория расчета строительных конструкций

арки, устойчивости дуги арки между V-образными раскосами, а также из условия прочности шпренгеля относительные деформации составили $\varepsilon_n = 0,0012$. С учетом разницы расчетных сопротивлений материалов натуре и модели равенство относительных деформаций имеет вид:

$$\varepsilon_n R_{ум} = \varepsilon_m R_{ун},$$

и, следовательно,

$$\sigma_m = \varepsilon_m E = \frac{\varepsilon_n R_{ум}}{R_{ун}} E.$$

Из расчета модели покрытия при узловой нагрузке на арку 100 кг наибольшее усилие в шпренгеле составило $N_m = 2512$ кг, наибольшее усилие в арке $N = -2561$ кг, $M = 57$ кгм. Требуемая площадь поперечного сечения шпренгеля составила

$$A_m = \frac{N_m R_{ун}}{\varepsilon_n R_{ум} E} = \frac{2512 \cdot 3050}{0,0012 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 2450} = 1,24 \text{ см}^2.$$

По конструктивным соображениям площадь поперечного сечения шпренгеля принята равной 4 см^2 (полоса $8 \times 0,5$ см). При данной площади сечения шпренгеля для равенства деформаций нагрузка на узел должна составлять 320 кг, а усилие в шпренгеле при этом равно $N_m = 8$ т. Относительная деформация шпренгеля

$$\varepsilon_m = 8000 / 2,1 \cdot 10^6 \cdot 4 = 0,001.$$

При узловой нагрузке $P = 320$ кг усилия в арке составили

$N_m = -2,561 \cdot 3,2 = -8,2$ т, $M_m = 0,057 \cdot 3,2 = 0,184$ тм, где $3,2 = 4/1,24$ – отношение фактической площади шпренгеля к требуемой при $P = 100$ кг. Исходя из данных усилий подобрано сечение арки в виде двутавра с толщиной полок 3 мм (рис. 2). Из условия местной устойчивости сжатого свеса полки определена ширина пояса, равная 60 мм. Момент инерции сечения $J_x = 108 \text{ см}^4$, момент сопротивления $W_x = 20,4 \text{ см}^3$, площадь сечения $A_m = 5,1 \text{ см}^2$.

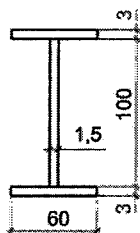


Рис. 2. Сечение модели арки

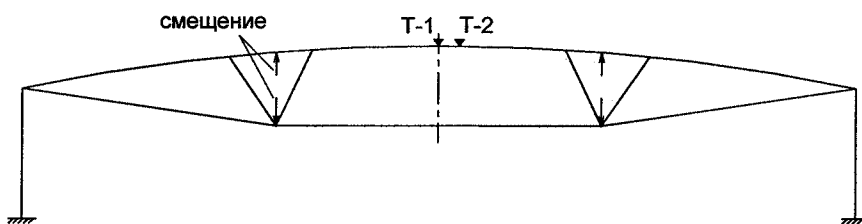


Рис. 3. Схема размещения приборов при создании смещения арки и шпренгеля

Напряжение

$$\sigma_m = \frac{N_m}{A_m} + \frac{M_m}{W_x} = \frac{8200}{5,1} + \frac{18400}{20,4} = 1608 + 902 = 2510 \text{ кг/см}^2,$$

откуда $\varepsilon_m = 0,0012 = \varepsilon_n$.

Сечение V-образных раскосов принято из труб 22×2 мм.

Таким образом, модель конструкции покрытия разработана с соблюдением следующих принципов: основные габаритные размеры (длина, высота, стрела подъема арки) геометрически подобны в масштабе 1:10 натурной конструкции; сечения арки и шпренгеля назначены из условия равенства относительных деформаций модели и натурной конструкции.

Изготовлены две модели арки, сегменты которых длиной 840 мм соединены на фланцах болтами диаметром 10 мм класса прочности 5.8, поставленными в отверстия такого же размера. Каждая арка соединена со шпренгелем телескопическими раскосами с резьбовыми упорами, позволяющими менять их длину. Для обеспечения устойчивости арок из плоскости собран и испытан блок из двух арок, соединенных прогонами, горизонтальными связями по верхним поясам и вертикальными – в зоне установки раскосов (как в реальной конструкции).

Предварительно для оценки общей жесткости конструкции было произведено смещение кривого бруса относительно шпренгеля с помощью телескопических соединений раскосов; при этом измеряли продольную деформацию верхней полки арки в зоне сплошного сечения и в зоне фланца (рис. 3). Измерение деформаций проводили с помощью тензометров Аистова с базой 50 мм. Получены следующие значения приращений деформаций (усредненные по результатам нескольких испытаний): по показаниям Т-1 $\Delta \varepsilon = 18$, по показаниям Т-2 $\Delta \varepsilon = 2$. Расстояние между тензометрами Т-1 и Т-2 составляет 100 мм.

Для изгибаемых элементов угол поворота сечения

$$\theta = M/B,$$

где M – изгибающий момент, B – погонная изгибная жесткость.

В месте расположения тензометров Т-1 и Т-2 принимаем, что $M = \text{const}$, и тогда отношение жест-

Таблица

костей сплошного сечения и фланцевого соединения равно

$$B_c/B_\phi = \theta_\phi/\theta_c.$$

Анализ деформативности системы кривой брус-шпренгель показал, что угол поворота для сплошного сечения составил (рис. 4, а):

$$\theta_c \cong \text{tg} \theta_c = \frac{\Delta c}{2 \cdot 0,5h} = \frac{2}{2 \cdot 0,5 \cdot 106} = 0,019,$$

а для фланцевого соединения при условии, что поворот происходит по оси нижнего болта (рис. 4, б), равен

$$\theta_\phi \cong \text{tg} \theta_\phi = 18/(2 \cdot 78) = 0,115.$$

Отношение

$$B_c/B_\phi = 0,115/0,019 = 6,05,$$

следовательно, жесткость фланцевого соединения в коньке в 6 раз меньше, чем целого сечения.

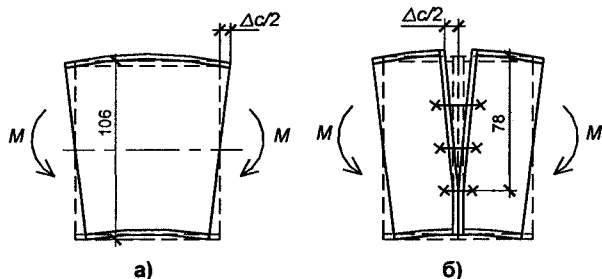


Рис. 4. Поворот сечения при изгибе: а – сплошного сечения; б – болтового соединения

В программе «Лира-9.2» выполнен расчет модели покрытия на симметричную и несимметричную вертикальную нагрузки. На рис. 5 показана схема нагружения конструкции равномерной нагрузкой, приведены эпюры продольных сил и изгибающих моментов. В таблице даны значения внутренних усилий для натурной конструкции и для модели при расчетных равномерных нагрузках. В соответствии с данными эпюрами выполнена расстановка приборов в сечениях модели, где возникают наибольшие внутренние усилия (рис. 7).

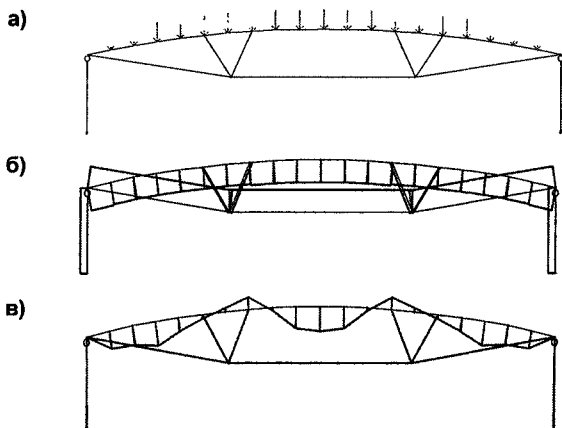


Рис. 5. Нагружение симметричной нагрузкой: а – схема нагружения; б – эпюра продольных сил; в – эпюра изгибающих моментов

Зона	Натурная конструкция		Модель	
	N, т	M, тм	N, т	M, тм
Сеч. 1; 7	-474,7	60,95	-7,37	0,19
Сеч. 2; 6	-474,7	14,26	-7,30	0,05
Сеч. 3; 5	-488,2	-41,54	-7,45	-0,07
Сеч. 4; 4*	-486,8	48,40	-7,42	0,17
Сеч. 8; 11	-21,2	–	-0,39	–
Сеч. 9; 10	-54,1	–	-0,83	–
Сеч. 12; 14	480,6	–	7,35	–
Сеч. 13	488,6	–	7,41	–

Примечание. Расположение сечений с приборами показано на рис. 7, а.

Для проведения эксперимента была разработана оснастка (рис. 6), которая позволила произвести нагружение, соответствующее нагружению натурной конструкции.

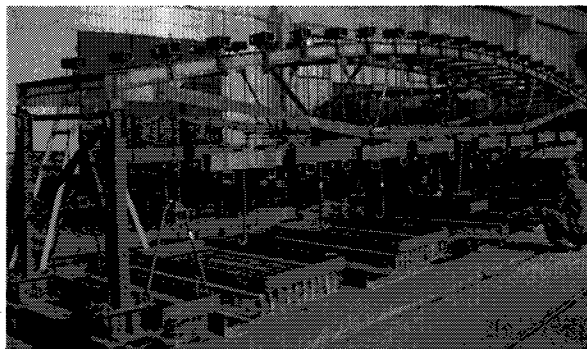


Рис. 6. Блок арок с оснасткой при испытании

Перемещения кривого бруса измерялись прогибомерами на базе индикатора часового типа с ценой деления 0,1 мм (рис. 7, б), а деформации – тензотрами Аистова с базой 50 мм и проволоочными тензорезисторами с базой 20 мм (рис. 7, в, г). Регистрация показаний тензодатчиков осуществлялась тензометрическим комплексом СИИТ-3.

Вертикальная нагрузка прикладывалась по кривому брус в 19 сечениях в местах расположения прогонов. Нагрузка создавалась путем укладки гирь средним весом 20,44 кг на платформы и через распределительные элементы передавалась в узлы. Для центровки в местах передачи нагрузки на кривой брус были установлены шаровые опоры (рис. 7, б, г).

Загружение конструкции производилось в 12 этапов: на первых 9 этапах создавалось симметричное нагружение равномерной нагрузкой с приращением нагрузки в узел арки на 30 кг, на 10, 11, 12-м этапах – несимметричное нагружение. Разрушение модели произошло на 12-м этапе.

Для анализа результатов испытаний рассмотрены следующие сечения: на арке – сечение 2 и 3 в зоне узлов примыкания раскосов к арке, сечение 4а в коньковом узле, где возникают максимальные перемещения арки, сечение 7 в опорной зоне арки

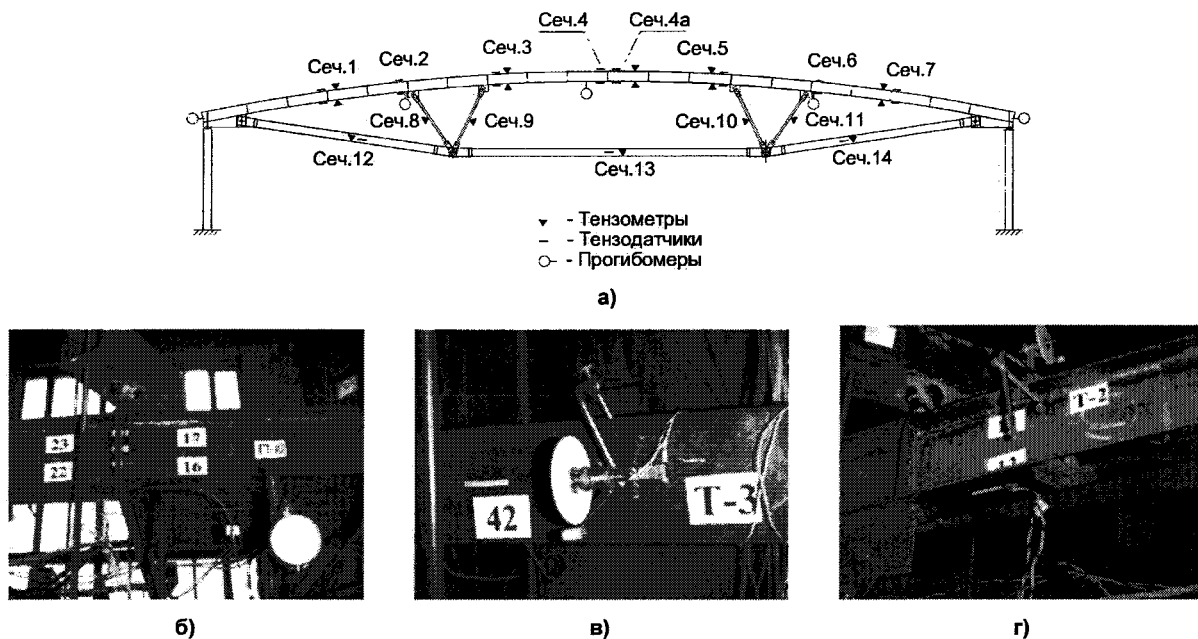


Рис. 7. Расстановка измерительных приборов: а – схема; б – тензодатчики и прогибомер на арке; в – тензодатчики и тензометр на шпренгеле; г – тензодатчики и тензометр на арке

с наибольшим положительным моментом; на шпренгеле – сечение 13; на раскосах – сечение 11. Для этих сечений построены зависимости на-

пряжений от нагрузки. В качестве примера на рис. 8 приведены зависимости для некоторых из перечисленных сечений. Из этих зависимостей видно

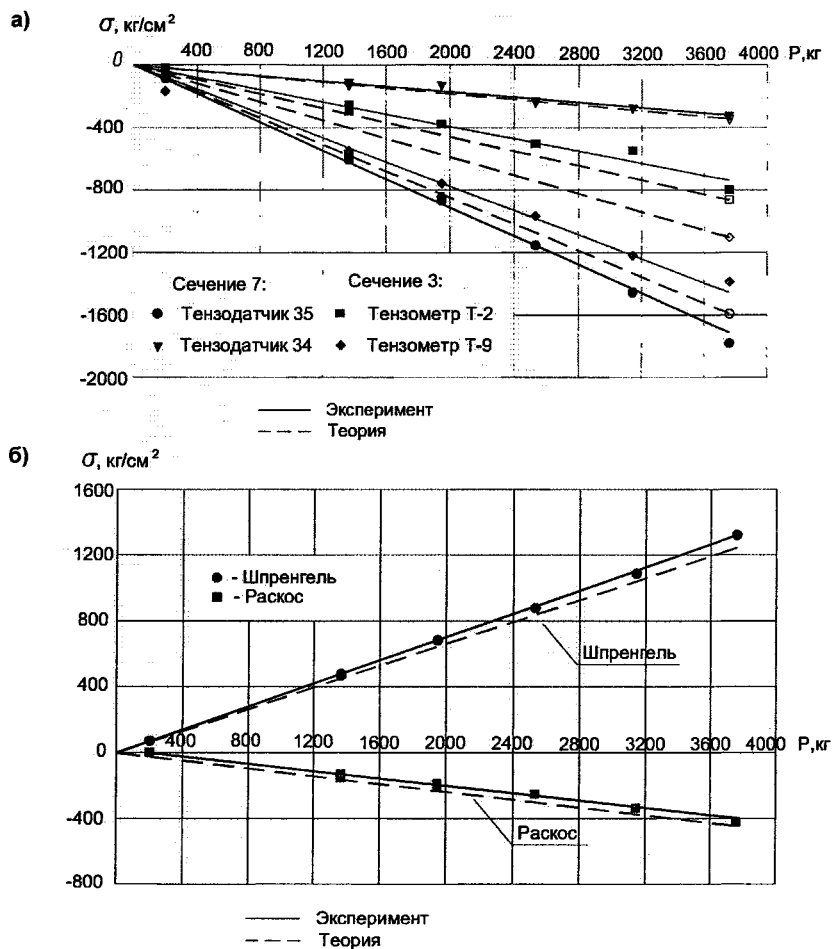


Рис. 8. Зависимости напряжений от нагрузки: а – для сечений на арке; б – для сечений на шпренгеле и раскосах

(рис. 8, а), что на всех этапах нагружения рост напряжений в сечениях арки происходит пропорционально увеличению нагрузки, что свидетельствует об упругой работе модели. Однако для отдельных сечений наблюдается увеличение напряжений по сравнению с теоретическими, причем разница между теорией и экспериментом растет с каждым этапом нагружения и составляет от 3–10 % на начальных этапах до 7–48 % на 9-м этапе. В элементах, испытывающих осевые усилия (шпренгель и раскосы) и не имеющих фланцевых соединений, расхождение между экспериментом и теорией незначительно и составляет не более 5 % (рис. 8, б). Это свидетельствует о влиянии податливости флан-

цевого соединения модели на ее напряженное состояние.

На рис. 9 приведены эпюры напряжений по сечениям арки при наибольшей симметричной нагрузке (9 этап) и при нагружении несимметричной нагрузкой (12 этап). Здесь же даны конструктивные поправки, равные отношению экспериментальных напряжений к теоретическим. Видно, что наблюдается непропорциональное увеличение напряжений в кривом брусе. Особенно сильная непропорциональность проявилась в зонах примыкания раскосов в сечениях 2 и 3 на 12-м этапе нагружения.

На рис. 10 представлена зависимость перемещений сечений 2 и 4 от симметричной нагрузки.

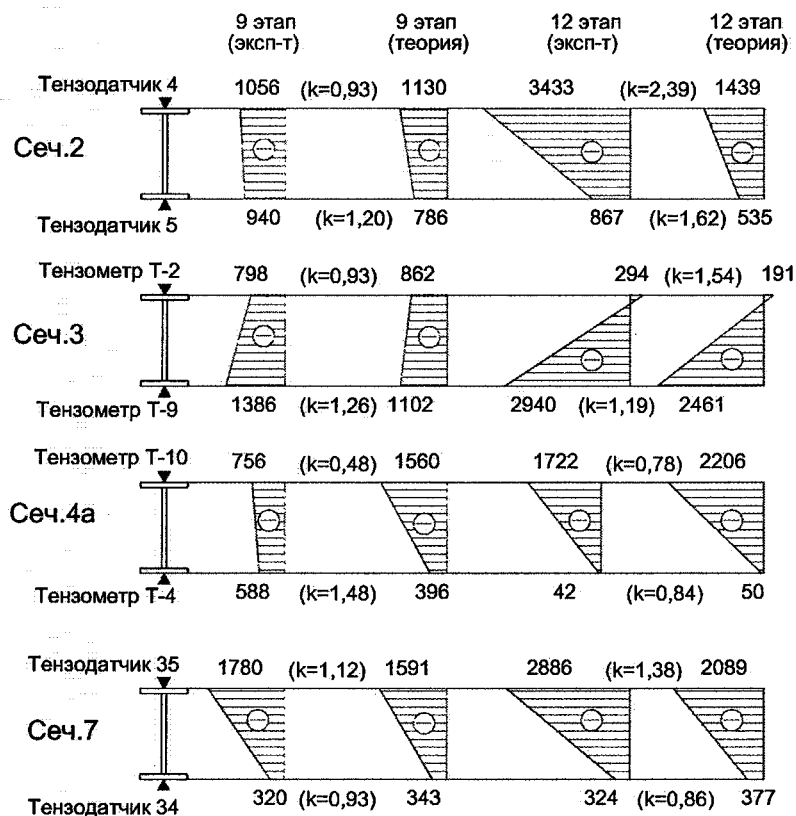


Рис. 9. Эпюры напряжений по сечениям арки, кг/см²

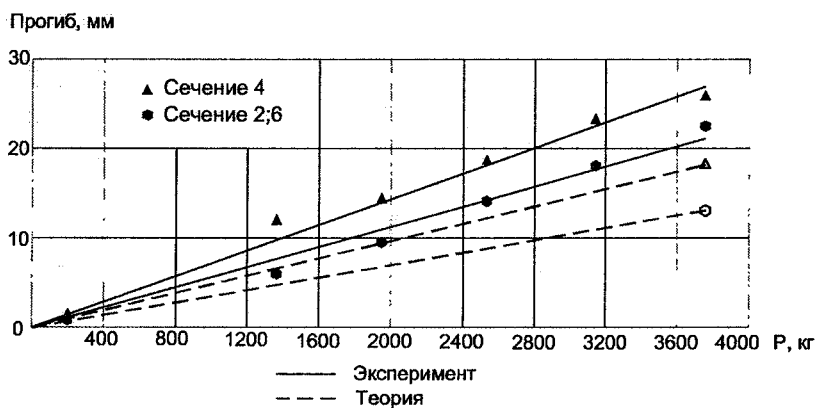


Рис. 10. Зависимости перемещений арки от нагрузки

Из рисунка видно, что экспериментальные прогибы арки превышают теоретическое значение от 11 % на начальном этапе до 72 % на последнем этапе приложения равномерной нагрузки. Это расхождение может быть вызвано податливостью фланцевых соединений сегментов арки.

По результатам эксперимента можно сделать вывод о снижении жесткости кривого бруса модели при действии вертикальной нагрузки из-за наличия фланцевых соединений его сегментов.

Литература

1. Дыховичный, Ю.А. *Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве* / Ю.А. Дыховичный. – М.: Стройиздат, 1982.
2. Еремеев, П.Г. *Большепролетное светопрозрачное покрытие Гостиного Двора в Москве* / П.Г. Еремеев, Н.В. Канчели // *Архитектура и строительство Москвы*. – 1999. – № 3. – С. 32–37.
3. Веников, В.А. *Теория подобия и моделирования* / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1976.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЕЗНАПОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Б.А. Ракитин, Б.В. Соловьёв

В статье представлены результаты проектирования и лабораторных испытаний нового вида продукции, изготавливаемого по технологии виброформования с немедленной распалубкой свежеотформованного изделия и набором прочности в естественных условиях. Исследовано напряжённо-деформированное состояние железобетонных труб для прокладки подземных трубопроводов, в зависимости от глубины заложения с учётом свойств массива грунта.

Введение

Бетон – один из наиболее универсальных, надёжных и экономичных материалов, применяемых для ливневой и сантехнической канализации, а также для ирригационных сооружений.

В результате применения передовых технологий и конструктивных решений использование бетонных труб в мире продолжает расти. Проектировщики и службы стандартизации считают их долговечной и рентабельной системой транспортировки жидкостей. Правильно разработанные подземные трубопроводы, будучи однажды проложены, сохраняют свою работоспособность без ремонта или расходов на обслуживание в течение многих лет.

Сегодня в нашей стране появились новые технологические решения, обеспечивающие производство безнапорных железобетонных труб в широком диапазоне диаметров, построены современные заводы для их изготовления.

В этой статье рассматривается первый этап работы по внедрению в производство продукции, изготавливаемой по технологии немецкой фирмы «SCHLOSSER-PFEIFFER».

Трубы железобетонные безнапорные предназначены для прокладки подземных трубопроводов, транспортирующих самотеком, не заполняя все сечение трубы, бытовые жидкости и атмосферные сточные воды, а так же подземные воды и производственные жидкости, не агрессивные к железобетону и уплотняющим резиновым кольцам.

Самыми распространёнными являются железобетонные трубы двух типов (рис. 1):

ТС – цилиндрические раструбы со ступенчатой стыковой поверхностью втулочного конца трубы и стыковыми соединениями, уплотняемыми резиновыми кольцами;

ТСП – то же, с подошвой.

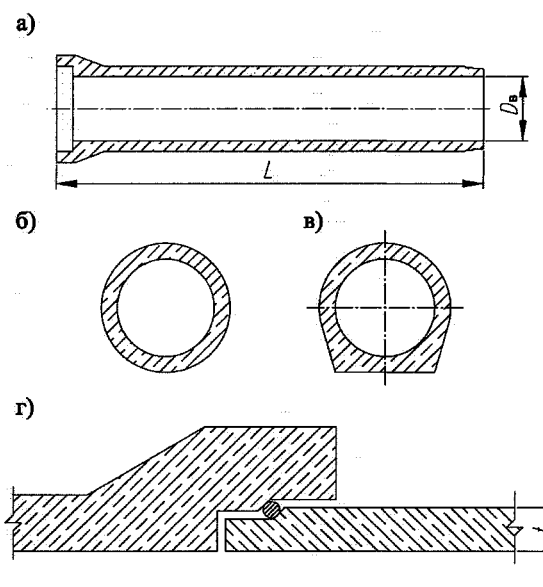


Рис. 1. Конструкция железобетонных безнапорных труб: а – продольное сечение трубы; б – поперечное сечение цилиндрической трубы; в – поперечное сечение трубы с подошвой; г – гибкий раструбный стык; L – длина трубы; D_b – внутренний диаметр; t – толщина стенки

Чтобы увеличить точность расчетов и уменьшить вероятность возникновения ошибок, было принято решение выполнить расчёт двумя различными способами и сравнить полученные результаты с лабораторными испытаниями труб.

Расчёт железобетонных безнапорных труб по прочности и трещиностойкости в стадии транспортирования

Ручной расчёт железобетонных безнапорных труб по прочности и трещиностойкости в стадии транспортирования, был выполнен по методике, изложенной в [2].

Теория расчета строительных конструкций

Конструкция рассчитывалась как балка на двух опорах. Общая длина трубы равна 2,6 м, а длина пролета между опорами составляет 1,8 м. Схема, принимаемая при расчёте кольцевого сечения, показана на рис. 2.

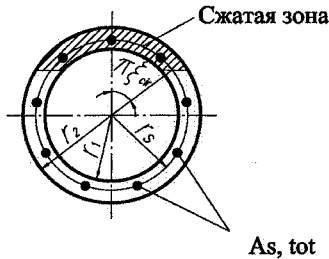


Рис. 2. Схема, принимаемая при расчёте кольцевого сечения

В результате расчёта получили, что коэффициент запаса по прочности в стадии транспортирования равен 9,62. После этого был произведён расчёт по раскрытию трещин в стадии транспортирования.

В результате выполненного расчёта были получены следующие результаты:

1. Трещины при действии полной нагрузки не образуются и расчёт по раскрытию трещин не нужен;
2. Запас по трещиностойкости составляет 26 %.

Исследование напряжённо-деформированного состояния безнапорных железобетонных труб

Задача была решена по методике, описанной в [4], и реализована в программном комплексе Lira 9.2 с использованием расчётной модели с постоянным коэффициентом постели (основание Винклера).

Расчётная схема безнапорной железобетонной трубы разбита на 290 конечных элементов типа пластина размером 50×100 мм (КЭ 41 – универсальный прямоугольный элемент оболочки) и 319

узлов. Элементы задаются двумя типами жёсткостей [1].

Основание трубы моделируется элементами с заданным коэффициентом отпора грунта [5]:

для песка – $C = 70 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$;

для глины – $C = 250 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$;

для скального грунта – $C = 1000 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$.

Нагрузки на проектируемый трубопровод приняты по результатам статического расчёта, выполненного по методике, изложенной в [4]. Всего в расчётной схеме 5 загрузений (рис. 3):

Загрузка 1 – нагрузка от собственного веса;

Загрузка 2 – нагрузка от вертикального давления грунта;

Загрузка 3 – нагрузка от горизонтального давления грунта;

Загрузка 4 – вертикальное давление грунта от временной нагрузки НК-80;

Загрузка 5 – горизонтальное давление грунта от временной нагрузки НК-80.

Все материалы данной модели считаем сплошными и постоянными по своим механическим свойствам. Данное предположение даёт возможность считать напряжения, деформации и перемещения отдельных точек непрерывными функциями координат. Кроме того, принимаем материалы упругими, поэтому можем решать задачу в рамках линейной теории упругости.

В результате проведённых исследований в программном комплексе Lira 9.2 было рассмотрено 9 расчётных схем сегмента трубы диаметром условного прохода 400 мм в зависимости от расчётной высоты засыпки грунтом: 2 м, 4 м, 6 м и подстилающего основания: песок, глина, скала (рис. 4).

Результаты расчётов позволили установить зависимости численных значений осадок трубопровода от расчётной высоты засыпки грунтом и

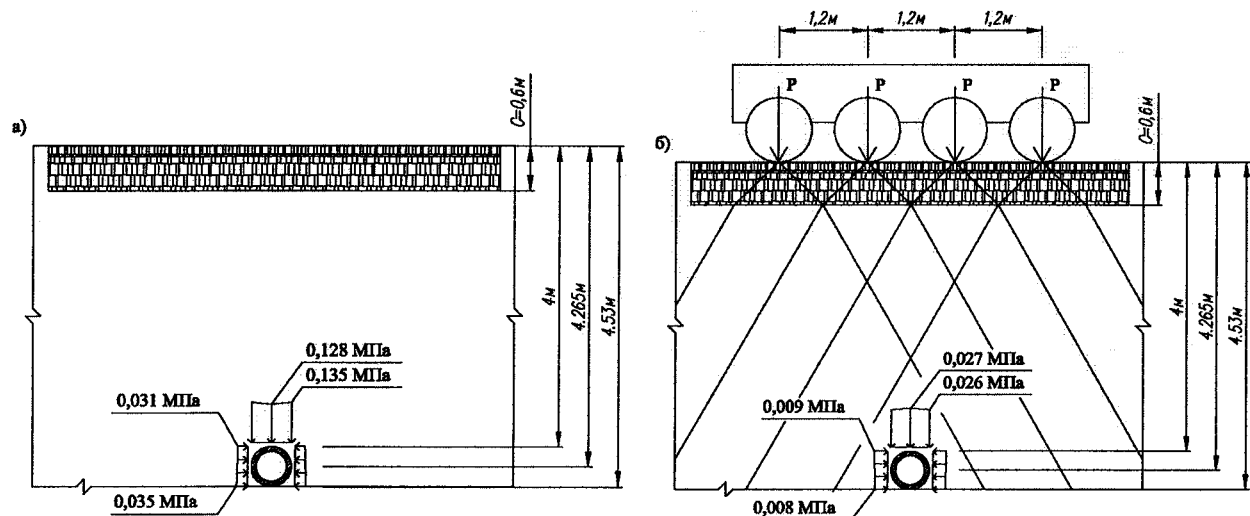


Рис. 3. Сбор нагрузок на конструкцию: а – нагрузки, действующие на конструкцию от вертикального и горизонтального давления грунта; б – вертикальное и горизонтальное давление грунта на конструкцию от временной нагрузки НК-80 (при расчётной высоте засыпки грунтом 4 метра)

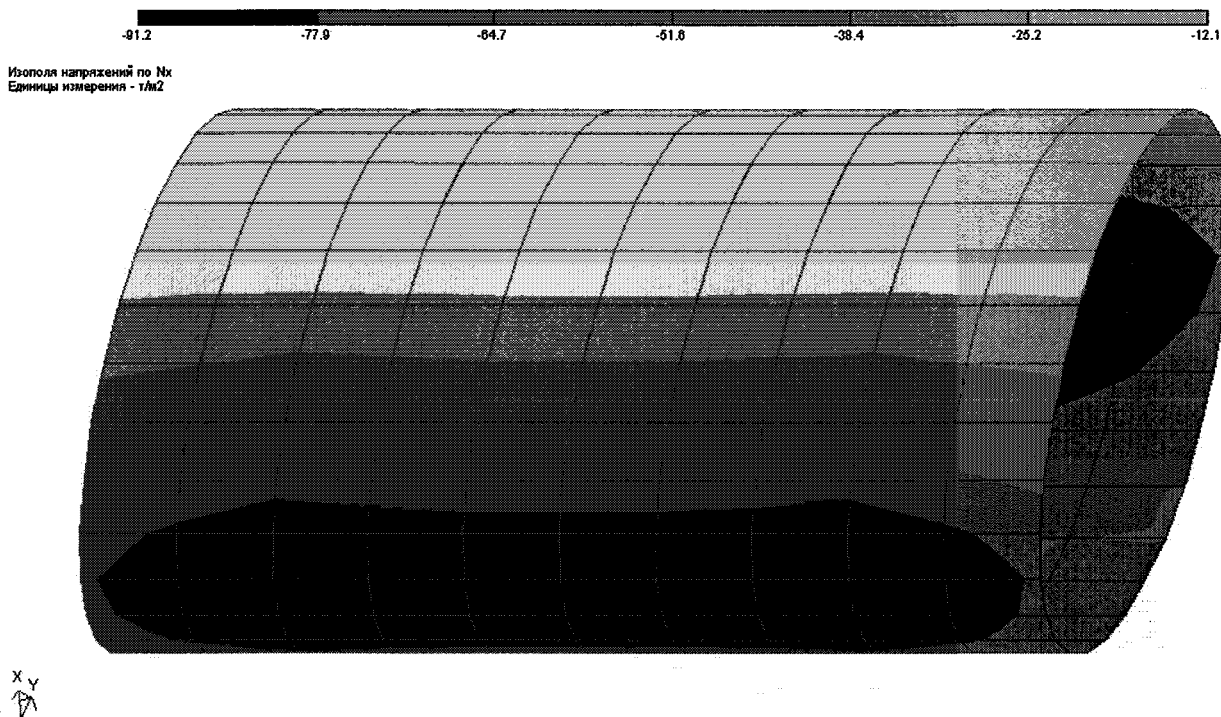


Рис. 4. Пример результата расчёта: изополя напряжений по N_x (расчётная высота засыпки грунтом 4 метра, подстилающий слой – глина)

типа подстилающего слоя (рис. 5), так у песка она в 3,5 раза больше, чем у глины и в 15 раз больше, чем у скального грунта.

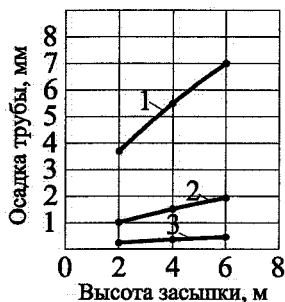


Рис. 5. Осадка трубы в зависимости от типа грунта: 1 – подстилающий слой – песок, 2 – подстилающий слой – глина, 3 – подстилающий слой – скала

В табл. 1 представлены напряжения в конструкции от совместного действия собственного веса массива грунта и временной нагрузки на поверхности земли класса НК-80.

Напряжения, действующие в конструкции, сильно зависят от высоты расчётного слоя засыпки грунтом. При глубине засыпки грунтом 6 метров они примерно в 1,3 раза выше, чем при 4 метрах, и почти в 2 раза, чем при двух метрах.

Проведение лабораторных испытаний

Лабораторные испытания труб на прочность, трещиностойкость и водонепроницаемость проводились в испытательном центре строительных материалов, изделий и конструкций ГРЦ «КБ имени академика В.П. Макеева» по методике описанной

Таблица 1

Перемещения и напряжения в конструкции

Показатели	Расчётная высота засыпки грунтом					
	2 метра		4 метра		6 метров	
	max	min	max	min	max	min
Перемещения по X, мм	-1,14	-1,03	-1,7	-1,53	-2,14	-1,94
Перемещения по Y, мм	-0,0478	0,0474	-0,0732	0,0727	-0,0872	0,0865
Напряжения N_x , МПа	-0,609	-0,0875	-0,912	-0,121	-1,16	-0,213
Напряжения N_y , МПа	-0,0783	0,0269	-0,114	0,041	-0,156	0,0515
Напряжения T_{xy} , МПа	-0,0679	0,0678	-0,102	0,102	-0,128	0,128
Напряжения M_x , кН·м/м	1,85	-1,72	2,62	-2,82	3,4	-3,16
Напряжения M_y , кН·м/м	0,376	-0,354	0,572	-0,538	0,689	-0,65
Напряжения Q_x , кН/м	-18,6	18,5	-28,1	28,1	-34,1	34,1
Напряжения Q_y , кН/м	2,15	-2,15	3,26	-3,26	4,01	-4

Подстилающий слой – глина.

Теория расчета строительных конструкций

в ГОСТ 6482–88 «Трубы железобетонные безнапорные. Технические условия» (рис. 6).

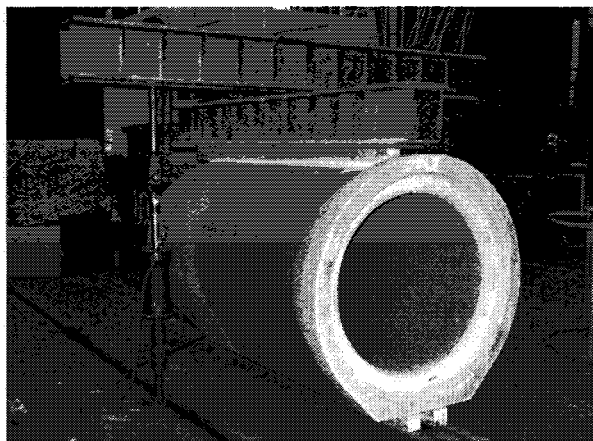


Рис. 6. Испытание раструбной железобетонной трубы на прочность и трещиностойкость в испытательном центре

Результаты испытаний труб на прочность и трещиностойкость приведены в табл. 2.

Так же при помощи программного комплекса Lira 9.2 был проведен машинный эксперимент, в результате были определены самые опасные места в конструкции (рис. 7).

При увеличении нагрузки до разрушающей образовались трещины по всей длине трубы под нагрузочной балкой, под опорами и по обеим боковым поверхностям (рис.8).

Лабораторные испытания показали, что:

1. Характер напряженно-деформированного состояния трубы, полученный при расчёте по разработанной расчётной схеме (см. рис. 4), подтвердился лабораторными испытаниями.

2. Железобетонные трубы, изготавливаемые ООО «ПКО «ЧелСИ» по технологии немецкой фирмы «SCHLOSSER-PFEIFFER», имеют резерв по прочности и трещиностойкости.

Таблица 2

Контрольные и испытательные нагрузки	Марка трубы			
	ТСП 120.25-3		ТС 40.25-3	
	Трещиностойкость	Прочность	Трещиностойкость	Прочность
Контрольная нагрузка, кН/м	66,64	121,17	26,98	49,05
Контрольная нагрузка, P_k , тс	16,9	30,9	6,88	12,5
Испытательная нагрузка, $P_{и}$, тс	17,7	32,0	6,89	12,5
Испытательная нагрузка, кН/м	69,4	125,4	27,0	50,0
Испытательная максимальная (разрушающая) нагрузка, тс	–	40,15	–	18,2
Испытательная максимальная (разрушающая) нагрузка, кН/м	–	157,4	–	71,4
Вид разрушения	–	Трещины по всей длине трубы	–	Трещины по всей длине трубы

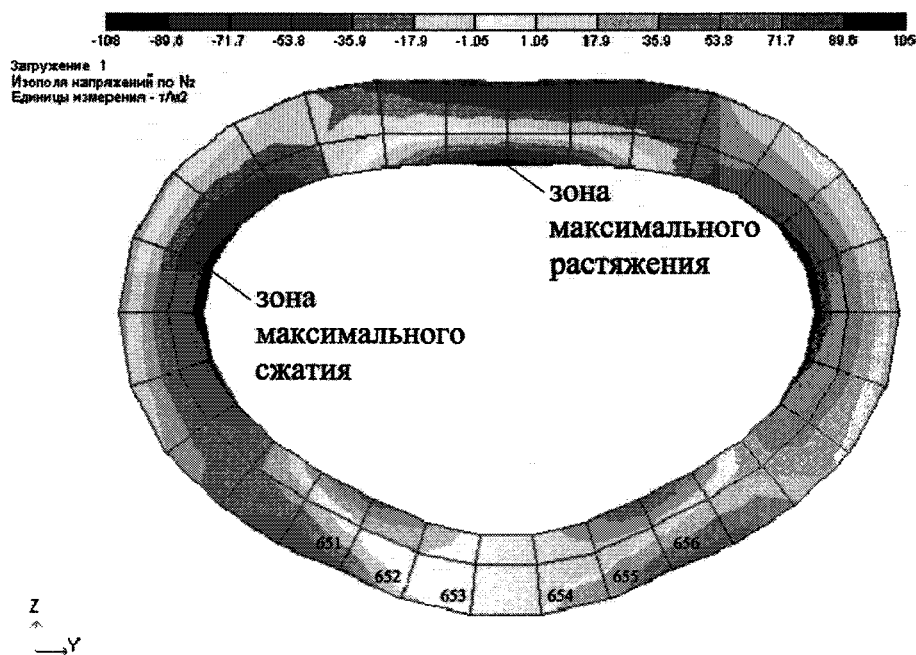


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние поперечного сечения трубы при проведении испытания на прочность

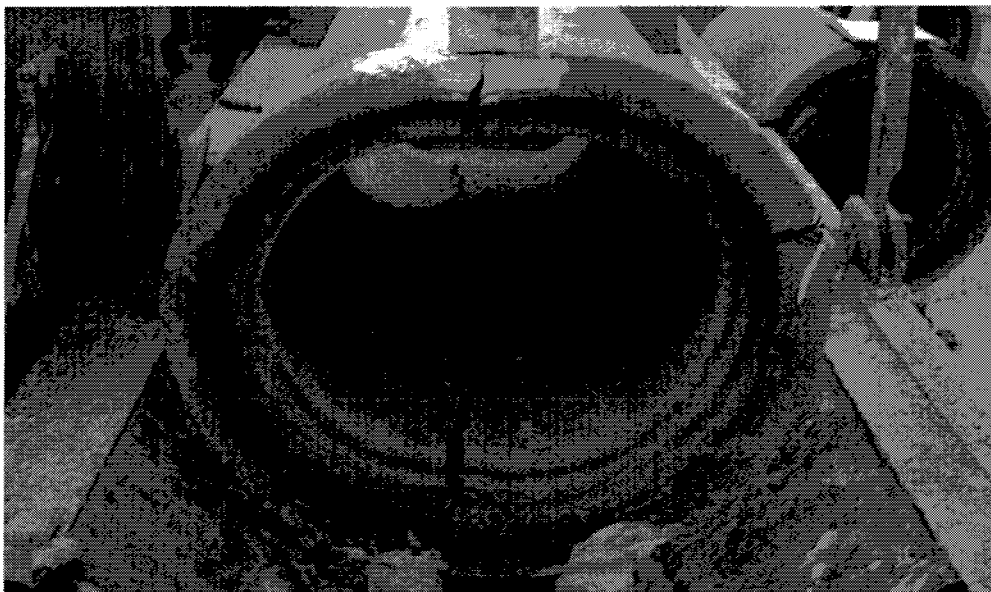


Рис. 8. Разрушение железобетонной трубы при испытании на прочность и трещиностойкость

3. Возможно дополнительное армирование железобетонных труб в тех участках конструкции, где произошло разрушение, с целью экономии арматуры в малонапряжённых местах конструкции.

Литература

1. Карякин, А.А. *Расчёт конструкций, зданий и сооружений с использованием персональных ЭВМ* / А.А. Карякин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 194 с.
2. *Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжёлого бетона без предварительного напряжения арматуры* (к СП 52-101-2003). ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. – М.: ОАО «ЦНИИПромзданий», 2005. – 214 с.
3. Сенкевич, Т.П. *Железобетонные трубы* / Т.П. Сенкевич, С.З. Рагольский, В.Н. Померанец; под ред. С.З. Рагольского. – М.: Стройиздат, 1989. – 272 с.
4. СНиП 2.05.03-84* *Мосты и трубы*. – М.: Госстрой России, 2000.
5. СП 32-105-2004 *Метрополитены*.
6. Ракитин, Б.А. *Исследование напряжённо-деформированного состояния безнапорных железобетонных труб с учётом свойств массива* / Б.А. Ракитин, Б.В. Соловьёв // *Строительная механика и расчёт сооружений*. – 2008. – Вып. 1. – С. 17–22.

Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 669.074

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКОНОМИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЖИМЕ ОТОПЛЕНИЯ

В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова

Рассмотрена задача оптимального управления тепловым режимом здания в нерабочее время. Найден алгоритм оптимального управления режимом прерывистого отопления. Уточнена область допустимых решений критерия оптимальности управления. Проведен анализ экономии энергии при использовании прерывистого отопления.

В условиях рыночной экономики и значительного повышения цен на энергоресурсы особую значимость приобретает задача эффективного использования тепловой энергии в системах теплоснабжения зданий. Поэтому актуальными являются исследования в области оптимального управления тепловым режимом здания, в частности, режимом прерывистого отопления.

Известно, что в жилых, общественных, административно-бытовых и производственных зданиях в нерабочее время температуру воздуха можно поддерживать на более низком уровне, чем в остальные промежутки времени. Это дает возможность сэкономить расход энергии на отопление. Однако для получения максимального эффекта от реализации такого, так называемого режима прерывистого отопления необходимо решить задачу об оптимальном управлении этим режимом. Рассмотрим постановку этой задачи.

Как нами установлено [1, 2, 3], температурный режим помещения удовлетворительно может быть описан следующим дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \theta(\tau) = kW_0(\tau), \quad (1)$$

где $\theta(\tau)$ – избыточная температура, $\theta(\tau) = t_B(\tau) - t_H(\tau)$, $t_B(\tau)$, $t_H(\tau)$ – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, T – постоянная времени, $W_0(\tau)$ – мощность системы отопления, τ – время, k – коэффициент передачи.

Количество теплоты, израсходованной системой отопления, оценивается функционалом

$$I = \int_0^{\tau_n} W_0(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где τ_n – заданное время.

Задача оптимального управления тепловым режимом формулируется следующим образом [4]: требуется найти такое управление мощностью системы отопления $W_0(\tau)$, которое переводило бы объект управления (1) из заданного начального состояния $\theta(0) = \theta_0$ в заданное конечное состояние $\theta(\tau_n) = \theta_k$ за заданное время τ_n , при этом расход теплоты I системой отопления был бы минимальным. Формально это записывается так:

$$I \rightarrow \min_{W_0}.$$

Мощность системы отопления должна при этом удовлетворять следующему ограничению:

$$W_0^{\min} \leq W_0(\tau) \leq W_0^y, \quad (3)$$

где W_0^y – установленная мощность системы отопления, W_0^{\min} – минимальная мощность системы отопления, как рекомендуется работой [5], эта мощность должна обеспечить поддержание температуры внутреннего воздуха на уровне 12 °С, исключая выпадение конденсата на поверхностях ограждений.

В работе [6] формулировалась аналогичная задача оптимального управления, однако при решении этой задачи предполагалось, что температура внутренних поверхностей ограждений «...задана и сохраняет постоянное значение в период натопа». Заметим, что данное допущение, как это нетрудно видеть, означает, что ограждающие конструкции здания, отличающиеся наибольшей теплоемкостью из всех участников теплообмена, никак не влияют на решение поставленной задачи, т.е. на выбор оптимального управления. Далее в работе утверждается, что исходная условная задача сводится к некоей безусловной задаче, экстремалами которой являются прямые линии, т.е. в опти-

мальном процессе $t_B(\tau)$ должна быть линейной функцией времени. Затем авторы, полагая дополнительно, что во время натопа и температура наружного воздуха является константой, из модели процесса находят, что оптимальное управление – мощность системы отопления тоже должно быть константой. После этого в работе [6] делается совсем нелогичный вывод, что «...оптимальность управления означает минимальность времени» натопа помещения и авторы переходят к рассмотрению задачи о максимальном быстродействии. Конечно, можно продолжить рассмотрение всех особенностей указанной работы, однако в этом нет большого смысла: уже отмеченные замечания делают сомнительным обоснованность выводов, поэтому достаточно смело можно утверждать, сформулированная выше задача оптимального управления еще не решена.

Кстати говоря, из выводов работы [6] следует, что оптимальное управление имеет только один интервал постоянства, кроме того, авторы, по-видимому, не различают понятия времени натопа и времени максимального быстродействия. Время натопа (разогрева помещения) может значительно превышать время максимального быстродействия, время максимального быстродействия – это минимально возможное время, за которое можно «напотить» помещение до заданной температуры.

В работе [7] оценивается эффективность режима максимального быстродействия, причем одним из декларируемых авторами тезисов является утверждение о том, что «разогрев ...необходимо начинать с разогрева наиболее теплых частей помещения». Вместе с тем, как уже это отмечалось, при отыскании оптимального управления авторы в [6] полагали, что температура внутренних поверхностей ограждений «...задана и сохраняет постоянное значение в период натопа». Таким образом, наблюдается явное противоречие между допущениями, принятыми при решении задачи, и тем, что рекомендуется при практическом использовании, якобы, этого решения. В целом, создается впечатление, что авторы, поставив, но, в общем-то, так и не решив задачу (как следует из материалов работы [7], это они поняли и сами), либо позаимствовали то, что давно было известно, например, в металлургической теплотехнике из результатов задач оптимального управления нагревом металла, эти результаты были обобщены, в частности, в работах [8, 9], либо высказали свои интуитивные соображения.

Однако вернемся к рассмотрению поставленной задачи и подчеркнем, что для режима прерывистого отопления данная задача имеет следующую особенность: в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени $[0, \tau_k]$ избыточная температура $\theta(\tau)$ должна быть равна одному и тому же значению θ_0 , такова особенность режима прерывистого отопления.

Для решения поставленной задачи нами была использована теория оптимального управления [10], согласно которой оптимальное управление в данной задаче будет представляться кусочно-постоянной функцией, принимающей граничные значения.

Для простоты будем считать, что продолжительность нерабочего времени такова, что в графике $W_0(\tau)$ есть два интервала постоянства и что длительность этих интервалов одинакова. Мощность системы отопления для первого интервала обозначим через W_{01} , а для второго интервала – через W_{02} . Так как за время режима прерывистого отопления избыточная температура $\theta(\tau)$ должна измениться от заданного начального значения θ_0 до требуемого конечного значения θ_0 , по какой-либо пока не известной траектории, то на основании (1) получается следующее уравнение, связывающее W_{01} и W_{02} :

$$kW_{02} + kW_{01} \cdot (1 - a) = \theta_0(2 - a), \quad (4)$$

где $a = 1 - \exp(-\tau_n / (2T))$.

Функционал I преобразуется в обычную функцию двух переменных W_{01} и W_{02} и будет иметь вид:

$$I = W_{01} \frac{\tau_n}{2} + W_{02} \frac{\tau_n}{2}. \quad (5)$$

Здесь общий множитель $\tau_n/2$ можно просто опустить, так как он не влияет на результаты решения задачи, т.е. на ответ.

Таким образом, поставленная задача оптимального управления свелась к условной задаче нелинейного программирования: требуется найти минимум функции I , заданной уравнением (5), при условии, что ее аргументы W_{01} и W_{02} должны удовлетворять соотношениям (3) и (4):

$$I \rightarrow \min_{W_{01}, W_{02} \in G}, \quad (6)$$

$$\text{где } G: \begin{cases} W_0^{\min} \leq W_{01}, W_{02} \leq W_0^y \\ kW_{02} + kW_{01}(1 - a) = \theta_0(2 - a) \end{cases}$$

Заметим, что исходную задачу неклассического вариационного исчисления можно свести к точно такой же задаче нелинейного программирования и другим способом, а именно методом параметризации функции управления, конкретно представляя ее состоящей из двух дискрет одинаковой длительности [11].

Для решения сведем условную задачу оптимизации (6) к безусловной методом подстановки, для этого из уравнения (4) выразим, например, W_{02} через W_{01} и подставим в критерий (5), тогда будем иметь, что

$$I = \theta_0 \frac{(2 - a)}{k} + aW_{01}. \quad (7)$$

Учитывая, что коэффициент a в реальных условиях удовлетворяет неравенству $1 > a > 0$, из

(7) найдем, что чем меньше мощность системы отопления на первом интервале постоянства, тем экономичнее режим, следовательно, на первом интервале мощность системы отопления должна быть равна W_0^{\min} . Примечательно, что если из (4) выразим W_{01} через W_{02} и подставим в критерий оптимальности, тогда задача оптимизации будет иметь вид:

$$I = \theta_0 \frac{2-a}{k(1-a)} - W_{02} \frac{a}{(1-a)} \rightarrow \min_{W_{02}}. \quad (8)$$

Из последнего соотношения следует: чем больше величина W_{02} , тем меньше величина I . Однако при этом следует учитывать ограниченность области допустимых решений. Если W_{01} уменьшать до нуля, то в этом случае из уравнения (4) следует, что W_{02} можно увеличивать только до значения $W_{02} = \theta_0(2-a)/k$. При этом будет достигаться минимально возможное значение критерия $I = \theta_0 \frac{2-a}{k}$.

Если же W_{01} разрешается уменьшать лишь до значения W_0^{\min} , то в этом случае, как это следует из (4), W_{02} можно увеличивать только до значения $W_{02} = \theta_0(2-a)/k - W_0^{\min}(1-a)$, достигаемое при этом значение критерия увеличится и составит уже величину $I = \theta_0 \frac{2-a}{k} + aW_0^{\min}$.

Если полагать, что $W_{02} = W_0^y$, то мощность системы отопления можно снижать лишь до следующей величины:

$$W_{01} = \left[\theta_0(2-a) - kW_0^y \right] / [k(1-a)].$$

Достижимое при этом значение критерия будет равно

$$I = \theta_0 \frac{(2-a)}{k} - W_0^y \frac{a}{(1-a)}.$$

Так как $1-a > 0$, то из вышеизложенного следует, что самым экономичным является режим, когда $W_{02} = W_0^y$, а

$$W_{01} = \left[\theta_0(2-a) - kW_0^y \right] / [k(1-a)]$$

(3-й случай), то есть на втором участке мощность системы отопления поддерживается на максимальном уровне, а на первом участке управления ее мощность выбирается из условия попадания в заданную температуру θ_0 перед началом рабочего дня в здании [12].

Таким образом, сначала для простоты решения задачи мы полагали, что длительность интервалов постоянства управления одинакова, однако на самом деле это далеко не всегда так, длительность интервалов постоянства в общем случае должна быть различной. Теперь выясним, какой должна быть длительность каждого интервала, с

тем, чтобы в начале и в конце процесса температура была бы равна θ_0 . Решение задачи оптимального управления в такой постановке, вероятнее всего, даст больший эффект. Обозначим длительность первого интервала через τ_1 , а второго – через τ_2 . Очевидно, что эти величины связаны следующими соотношениями:

$$\begin{cases} kW_{02} \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}} \right) + kW_{01} \left(e^{-\frac{\tau_2}{T}} - 1 + a \right) = a\theta_0, \\ \tau_1 + \tau_2 = \tau_n \end{cases} \quad (9)$$

где $W_{01} = W_0^{\min}$ – минимальная мощность системы отопления, $W_{02} = W_0^y$ – максимальная, установленная тепловая мощность, $a = 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right)$.

Найдем из первого уравнения системы (9) выражение для определения τ_2 :

$$\tau_2 = -T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right). \quad (10)$$

Из второго уравнения системы (9) найдем, что продолжительность первого интервала времени будет определяться следующим образом:

$$\tau_1 = \tau_k + T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right). \quad (11)$$

Функционал I в этом случае будет иметь вид:

$$I = W_{01} \left(\tau_k + T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right) + W_{02} \left(-T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right). \quad (12)$$

Из (12) следует, что в отличие от предыдущего случая (предыдущей постановки задачи оптимального управления) критерий оптимальности будет уже нелинейной, точнее трансцендентной, функцией аргументов W_{01}, W_{02} . К этому критерию необходимо было присоединить область допустимых решений, вытекающую из постановки задачи.

Область допустимых решений определяется следующими условиями:

– когда выражение, содержащееся под знаком логарифма, будет положительным, то есть

$$\frac{W_{01} - W_{02} + a \left(\frac{\theta_0}{k} - W_{01} \right)}{W_{01} - W_{02}} > 0; \quad (13)$$

– когда значение продолжительности второго

промежутка времени будет положительным или равным нулю, то есть

$$\tau_2 \geq 0; \tag{14}$$

– когда значение продолжительности первого промежутка времени (времени остывания) будет положительным или равным нулю, то есть

$$\tau_1 \geq 0; \tag{15}$$

– ограничения, накладываемые на значения мощностей системы отопления

$$W_{01}^{\min} \leq W_{01}, W_{02} \leq W_0^y.$$

Проанализируем каждое из вышеприведенных ограничений.

Рассмотрим ограничения, накладываемые на область допустимых решений, условием (13). Выражение (13) будет иметь положительное значение в двух случаях:

$$1) \text{ когда } \begin{cases} W_{01} - W_{02} + a \left(\frac{\theta_0}{k} - W_{01} \right) > 0, \\ W_{01} - W_{02} > 0; \end{cases} \tag{16}$$

$$2) \text{ когда } \begin{cases} W_{01} - W_{02} + a \left(\frac{\theta_0}{k} - W_{01} \right) < 0, \\ W_{01} - W_{02} < 0. \end{cases} \tag{17}$$

В результате учета ограничений (16), область допустимых решений будет определена условиями (18)–(19):

$$\begin{cases} W_{01} < \frac{\theta_0}{k}, \\ W_{02} < W_{01}; \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} W_{01} > \frac{\theta_0}{k}, \\ W_{02} < W_{01} (1-a) + \frac{a\theta_0}{k}. \end{cases} \tag{19}$$

С учетом выражения (17), область допустимых решений будет ограничена условиями (20)–(21):

$$\begin{cases} W_{01} < \frac{\theta_0}{k}, \\ W_{02} > W_{01} (1-a) + \frac{a\theta_0}{k}; \end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{cases} W_{01} > \frac{\theta_0}{k}, \\ W_{02} > W_{01}. \end{cases} \tag{21}$$

Таким образом, исходя из условий (16) и (17) область допустимых решений для уравнения (12) будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Данная область построена для здания с теплотехническими характеристиками, отвечающим требованиям [13]. Установленная мощность системы отопления равна $W_0^y = 4236$ Вт, избыточная температура $\theta_0 = 55$ °С, $k = 0,013$ °С/Вт, тогда $\theta_0/k = 4230,8$ Вт. Не трудно заметить, что значение коэффициента θ_0/k , при котором происходит изменение условий ограничения, очень близко к величине установленной тепловой мощности.

Рассмотрим ограничения, накладываемые на область допустимых решений, вытекающие из условия (14). Продолжительность второго проме-

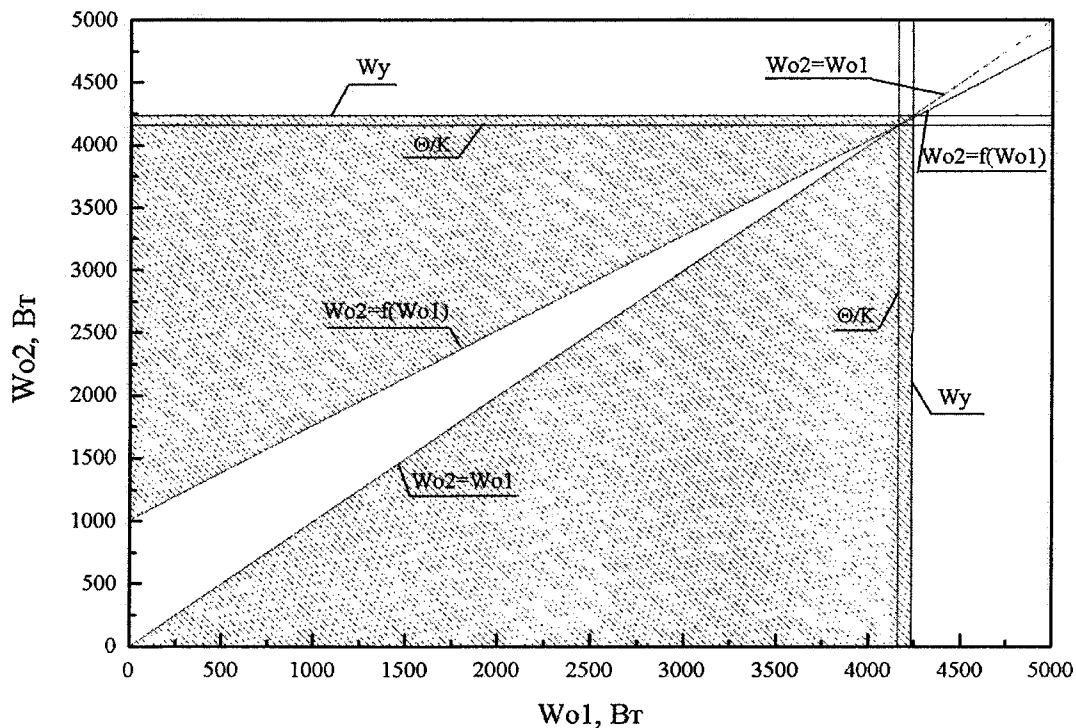


Рис. 1. Область допустимых решений уравнения функционала / с учетом ограничения (13), для здания, отвечающего требованиям СНиП по теплотехническим показателям

Инженерное оборудование зданий и сооружений

жутка времени, должна быть положительной или равной нулю, то есть

$$-T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \geq 0. \quad (22)$$

Данное выражение будет иметь положительное значение в двух случаях:

$$\begin{cases} W_{01} < W_{02}, \\ W_{01} < \frac{\theta_0}{k}; \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} W_{01} > W_{02}, \\ W_{01} > \frac{\theta_0}{k}. \end{cases} \quad (24)$$

Тогда область допустимых решений с учетом прежних (18)–(21) и вновь полученных ограничений (23)–(24) будет иметь вид, представленный на рис. 2. Область построена для вышеприведенного здания, и представлена заштрихованными площадями. Очевидно, что происходит сокращение области допустимых решений до трех зон.

Наконец, рассмотрим ограничения, накладываемые на область допустимых решений, вытекающие из условия (15). Продолжительность первого промежутка времени должна быть положительной или равной нулю, то есть

$$\tau_k + T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_1}{W_1 - W_2} \right) \geq 0. \quad (25)$$

В результате решения неравенства (25) выявляются следующие ограничения:

$$\begin{cases} W_{01} \geq W_{02}, \\ W_{02} \leq \frac{\theta_0}{k}; \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} W_{01} \leq W_{02}, \\ W_{02} \geq \frac{\theta_0}{k}. \end{cases} \quad (27)$$

Тогда область допустимых решений с учетом прежних (18)–(21), (23)–(24) и вновь полученных ограничений (26)–(27) будет иметь вид, представленный на рис. 3. Область, построенная для вышеприведенного здания, сокращается до двух зон, представлена заштрихованными площадями.

Однако данная область может быть расширена в некоторых случаях, например, при уменьшении величины избыточной температуры, а также при увеличении располагаемой мощности системы отопления. Расширение пределов области происходит вследствие того, что значение максимальной расчетной тепловой мощности остается прежним, а значение избыточной температуры θ (а именно температуры наружного воздуха) – уменьшается по сравнению с расчетной температурой для проектирования системы отопления, следовательно, происходит снижение теплотерь здания. Таким образом, появляется дополнительный резерв мощности системы отопления для разогрева здания, что позволяет расширить пределы регулирования тепловой мощностью. Подобную ситуацию можно проиллюстрировать рис. 4. Для расчета применя-

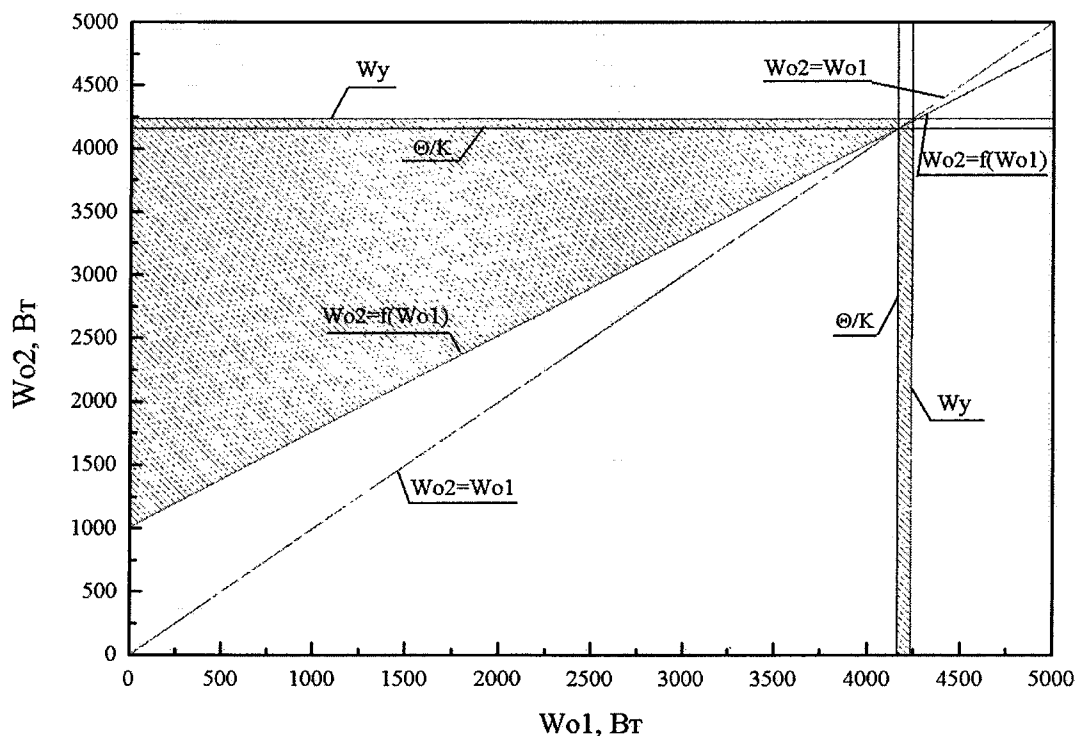


Рис. 2. Область допустимых решений уравнения функционала / с учетом ограничений (13)–(14)

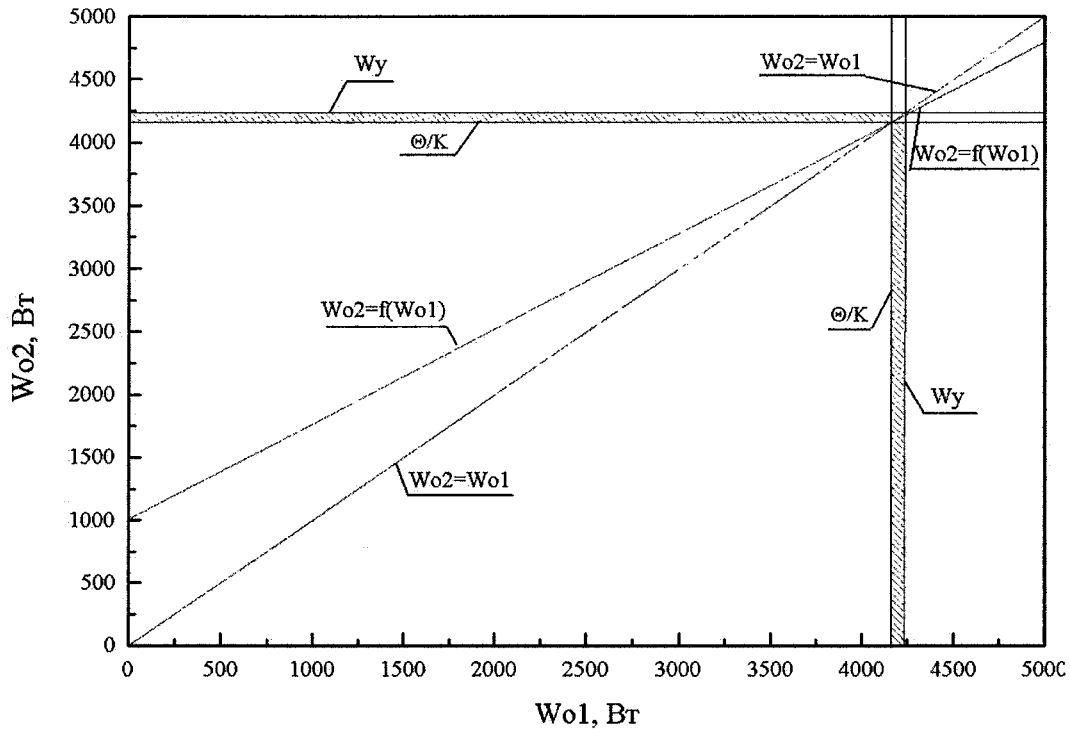


Рис. 3. Область допустимых решений уравнения функционала I с учетом всех ограничений при $\theta_0 = 55^\circ\text{C}$

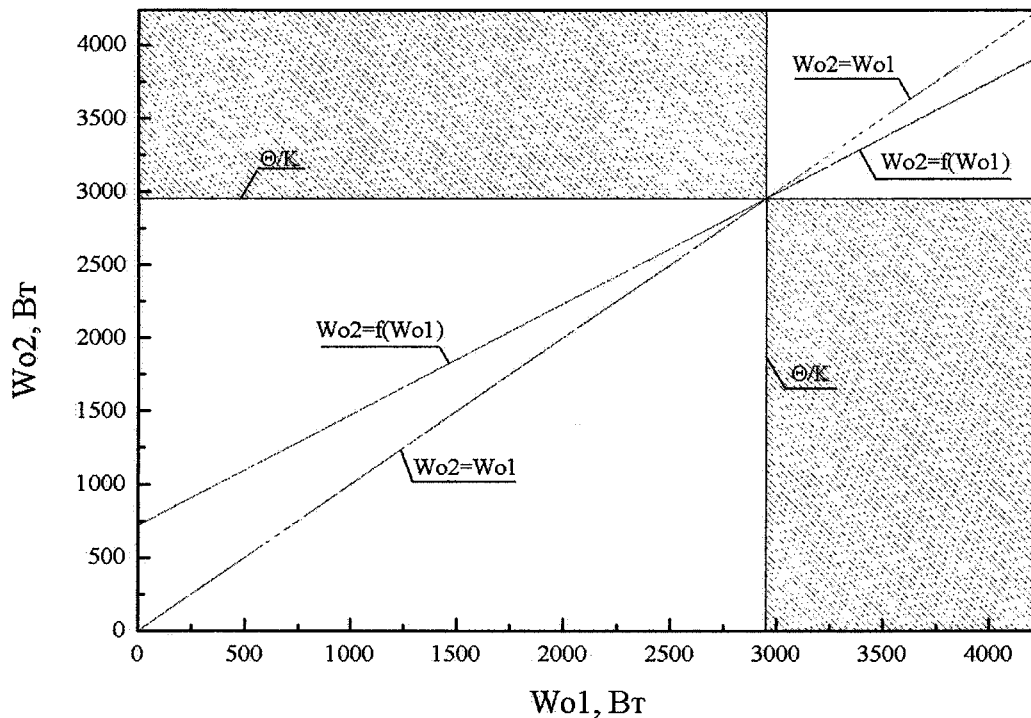


Рис. 4. Область допустимых решений уравнения функционала I для избыточной температуры $\theta_0 = 39^\circ\text{C}$

лось ранее рассмотренное здание. На графике изображена область определения функционала I для избыточной температуры $\theta_0 = 39^\circ\text{C}$.

Схожая ситуация может наблюдаться для здания, имеющего завышенную установленную тепловую мощность. Область определения функционала I в этом случае показана на рис. 5. Данная область

построена для здания со следующими теплотехническими характеристиками: расчетная мощность системы отопления равна $W_0^y = 3668,5 \text{ Вт}$, располагаемый диапазон изменения значений тепловой мощности составляет $W_0 \in [0; 11\,000 \text{ Вт}]$, избыточной температурой $\theta_0 = 55^\circ\text{C}$, $k = 0,015^\circ\text{C/Вт}$,

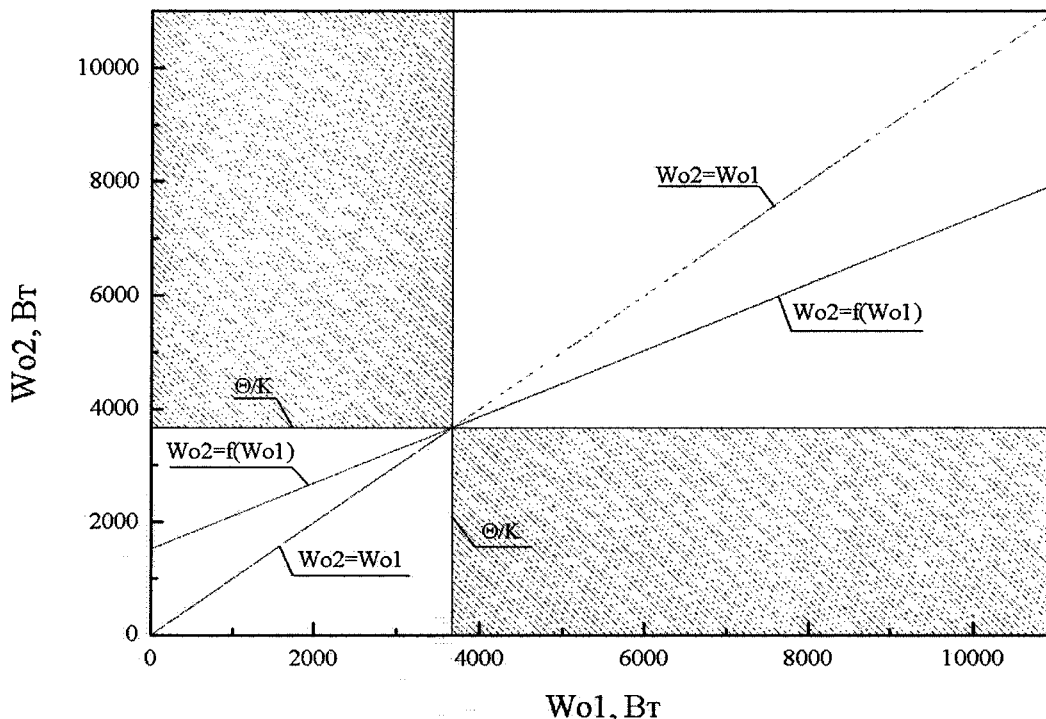


Рис. 5. Область определения функционала I в случае, когда здание имеет завышенную установленную тепловую мощность

тогда $\theta_0/k = 3666,7$ Вт. На практике подобное возможно после утепления здания, подключенного к автономному источнику теплоты. В этом случае теплотехнические характеристики здания улучшаются, расчетная тепловая мощность W_0^y уменьшается, а располагаемый диапазон регулирования мощности системы отопления останется неизменным (при условии, что автономный источник теплоты остался прежним).

Заштрихованные зоны на рис. 5 являются областями допустимых решений функционала I . Полученные области ограничены условиями (13)–(15).

Таким образом, была найдена область допустимых значений функционала I для зданий с разными теплотехническими характеристиками, а также различными параметрами источника теплоты на вводе в здание.

Как уже отмечалось, критерий оптимальности (12) – это нелинейная функция аргументов W_{01} и W_{02} . Решить задачу оптимизации критерия I аналитическим путем не представлялось возможным, поэтому для решения этой задачи была написана программа на языке C++, в которой применялись методы покоординатного спуска и золотого сечения. Оптимальное управление в каждом конкретном случае находится путем использования разработанной программы. Программа по определению оптимального режима прерывистого отопления имеет удобный пользовательский интерфейс. В качестве исходных данных заносятся: продолжительность нерабочего времени, избыточная температура, диапазон изменения мощности системы

отопления. Результаты расчетов выводятся в большом окне. В результате вычислительных экспериментов подтвердился ранее полученный вывод о том, что функционал, I , оценивающий количество теплоты, израсходованной системой отопления, тем меньше, чем меньше тепловая мощность на первом промежутке времени и больше на втором.

Далее для различных температур наружного воздуха была определена эффективность разработанного режима прерывистого отопления для случая, когда здание имеет автономный источник теплоты. Оказалось, например, что при температуре наружного воздуха -18 °С и продолжительности нерабочего периода 15 часов оптимальный режим прерывистого отопления для выбранного здания экономичнее по расходу теплоты на 6,4 % по сравнению с обычным режимом отопления. При температуре наружного воздуха -5 °С эта экономия составит 9,3 %. При этом установлено, что применение режима прерывистого отопления в зданиях, подключенных к центральным тепловым сетям, не дает существенной экономии тепловой энергии [4, 14, 15].

График отопления здания в течение суток, включая режим оптимального управления в нерабочее время, приведен в работах [14–16].

Литература

1. Панферов, В.И. Моделирование и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашнина // *Материалы Международной науч.-практической конф. «Теоре-*

тические основы теплогазоснабжения и вентиляции»: сб. – М.: МГСУ, 2005. – С. 94–98.

2. Панферов, В.И. Идентификация и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Вестник ГОУ ВПО УГТУ-УПИ «Строительство и образование». – 2005. – № 14(66). – С. 351–353.

3. Панферов, В.И. Математическая модель теплового режима зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. 5-й Всероссийской науч.-техн. конф. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С. 23.

4. Панферов, В.И. Минимизация затрат энергии в процессе разогрева помещения при прерывистом отоплении / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Материалы Юбилейной XIV Международной науч.-техн. конф. «Достижения науки – агропромышленному производству»: сб. тр. – Челябинск: ЧГАУ, 2006. – Ч. 4. – С. 165–168.

5. Сканава, А.Н. Отопление / А.Н. Сканава, Л.М. Махов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 546 с.

6. Табуничиков, Ю.А. Минимизация расхода энергии, затрачиваемой на отопление помещения / Ю.А. Табуничиков, М.М. Бродач // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 12. – С. 84–87.

7. Табуничиков, Ю.А. Экспериментальное исследование оптимального управления расходом энергии / Ю.А. Табуничиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2006. – № 1. – С. 32–36.

8. Панферов, В.И. Анализ экономических способов нагрева металла в методических печах / В.И. Панферов, Б.Н. Парсункин, Е.В. Торопов // Автоматическое управление металлургическими процессами: межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГМА им. Г.И. Носова, 1996. – С. 63–72.

9. Панферов, В.И. О принципе экономичного управления нагревом металла и его реализации в методических печах / В.И. Панферов // Труды III

Международной науч.-практ. конф. «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова. – М.: МИСиС, 2006. – С. 467–470.

10. Теория автоматического управления: Нелинейные системы управления при случайных воздействиях: учеб. для вузов/ А.В. Нетушил, А.В. Балтрушевич, В.В. Бурляев и др.; под ред. А.В. Нетушила. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983. – 432 с.

11. Растринин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. Радио, 1980. – 232 с.

12. Панферов, В.И. Оптимизация режима прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Проблемы теплоэнергетики: материалы Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – С. 31–32.

13. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». – Госстрой России, 2004.

14. Панферов, В.И. Экономия тепловой энергии при различных режимах прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. докл. 7-й Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 11–16.

15. Панферов, В.И. Оптимальный режим прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Материалы Пятой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 161–165.

16. Панферов, В.И. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8. – № 20(92). – С. 3–9.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ю.Н. Денисенко, Г.И. Калягин, Д.М. Крамар, В.И. Панферов, В.М. Токарев

Приводятся данные о конструктивной и функциональных структурах разработанной установки, предназначенной для экспериментального исследования влияния режимов отпуска теплоты на процессы, протекающие в системе отопления и определения характеристик отопительных приборов.

Установка представляет собой действующую автономную систему отопления закрытого типа (рис. 1) с принудительной циркуляцией, содержащую все основные компоненты современных систем отопления.

Основные компоненты автономной системы отопления собраны на настольной панели, внешний вид которой спереди изображен на рис. 1, а вид сзади на рис. 2. Принципиальная схема системы отопления приведена на рис. 3. Последовательная работа автоматизированной установки, по ходу движения теплоносителя, описана ниже.

В системе используется расширительный бак 2 мембранного типа (объемом 8 литров), позволяющий компенсировать изменение объема теплоносителя при его нагреве и охлаждении. Избыточное давление в контуре и температуру теплоносителя на выходе из теплогенератора 1 можно наблюдать по шкалам манометрического термометра 3. При повышении давления в системе выше установленного срабатывает предохранительный клапан 4,

открывая выход воде в специальный сосуд 32, расположенный на задней стенке панели.

Для выпуска воздуха из системы используются автоматический клапан поплавкового типа 5 и краны «Маевского» – 13, установленные на отопительных приборах (ОП1 и ОП2) 12.

Из теплогенератора теплоноситель подается на трехходовый кран КР1 – 7. На другой вход КР1 поступает холодный теплоноситель с «обратной» ветви системы. В зависимости от положения рукоятки крана 7, температура теплоносителя на его выходе (возмущающее воздействие) может оперативно изменяться в пределах от максимального до минимального значения. Эта возможность предусмотрена для исследования характеристик автоматического регулятора, представляющего собой узел смешения (УС) 6 – трехходовой клапан с электроприводом «ESBE», установленный в контуре системы отопления. Электропривод УС управляется ПЭВМ (персональный компьютер с монитором клавиатурой мышью и платой ввода-вывода

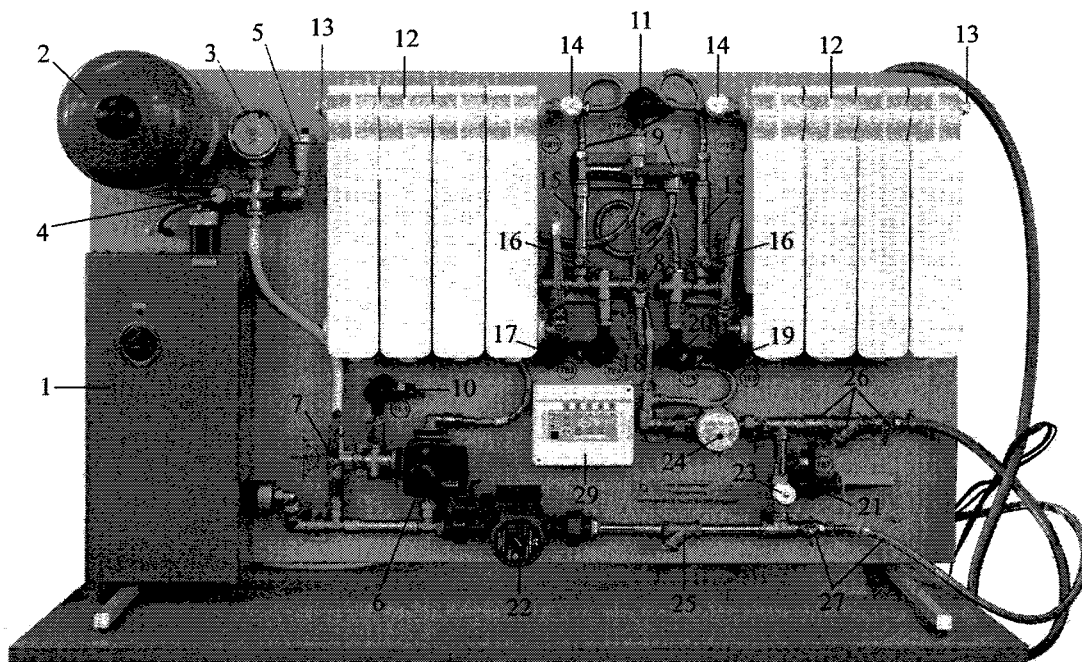


Рис. 1. Внешний вид установки спереди

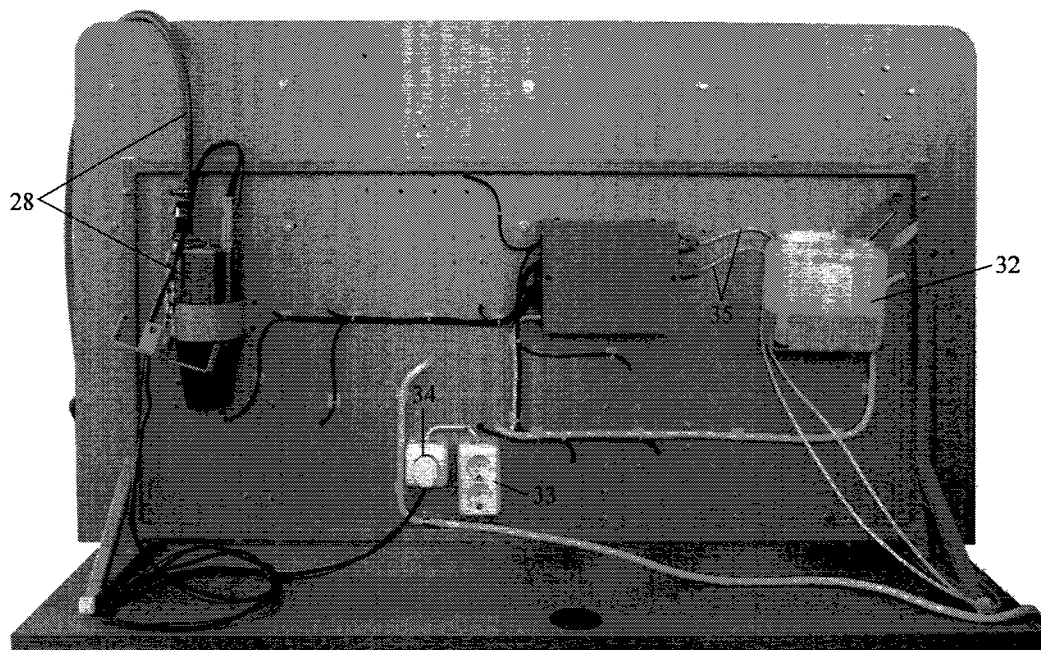


Рис. 2. Внешний вид установки сзади

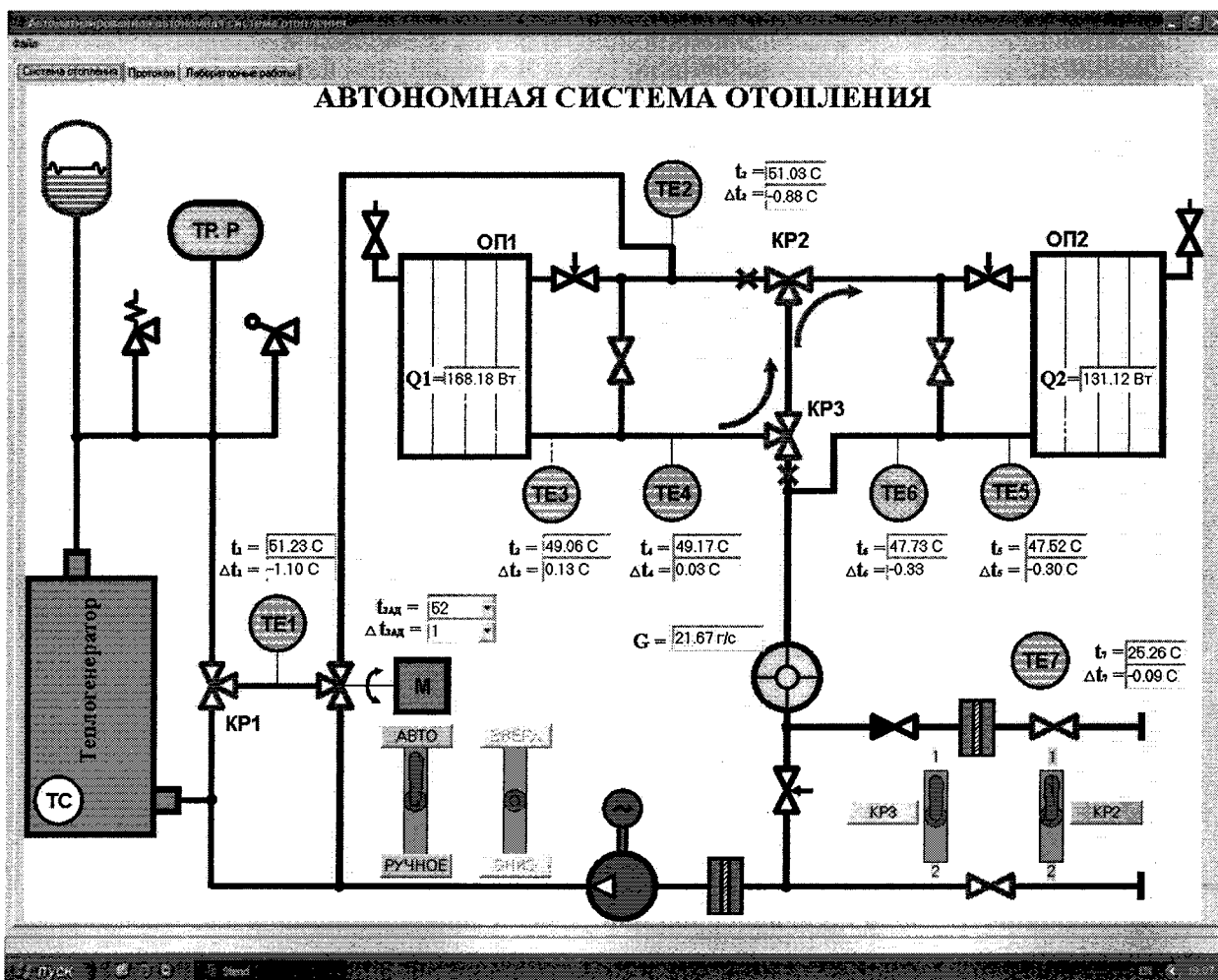


Рис. 3. Интерфейс управляющей программы. «Окно функциональной схемы»

Инженерное оборудование зданий и сооружений

информации). Параметры регулятора УС оперативно устанавливаются из управляющей программы, интерфейс которой изображен на рис. 3. Предусмотрено также ручное управление регулятором из управляющей программы.

Температура теплоносителя на входе и выходе из УС измеряется датчиками TE1 – 10 и TE2 – 11 и отображается на экране монитора. Для регистрации температуры теплоносителя используются термопреобразователи сопротивления типа ТС004 (TE1 – TE7).

На выходе из УС теплоноситель подается к ОП1 и ОП2, каждый из которых может быть подключен по параллельной или последовательной схемам. Для исследования таких режимов работы используются: ручной регулятор 14, переключатель 15 с калиброванными ограничительными шайбами и отключающий переключатель кран 16. Схема включения отопительных приборов 12 в систему определяется положением трехходовых кранов КР2 – 9 и КР3 – 8.

Вход отопительного прибора ОП1 всегда подключен к верхней точке подачи теплоносителя. Выход ОП1 в зависимости от положения трехходового крана КР3 подключается к входу трехходового крана КР2 (положение 1) или к «обратной» магистрали (положение 2).

Температура теплоносителя в различных точках системы измеряется проточными термометрами сопротивления 10 – 11, 17 – 21 с унифицированным выходом и выводится на монитор ПЭВМ (см. рис. 3 и 4). Показания обновляются один раз в секунду. Поскольку температура изменяется относительно медленно, то рядом с текущим значением температуры выводится изменение температуры за последние 10 секунд. В случае если процесс установился, то изменение будет близко к нулю. Наблюдение за изменением значений температур позволяет оценить динамику процесса и сделать вывод об установившемся режиме.

Датчик 11 (TE2) измеряет температуру теплоносителя на выходе из УС. Она же равна температуре теплоносителя в верхней точке «подачи».

Датчик 17 (TE3) измеряет температуру теплоносителя собственно на выходе из ОП1, без учета теплоносителя протекающего через переключатель 15. Датчик 18 (TE4) измеряет температуру теплоносителя на выходе из ОП1, с учетом теплоносителя протекающего через переключатель 15. Она же равна температуре теплоносителя на входе в «нижний» отопительный прибор ОП2 при последовательном включении с ОП1.

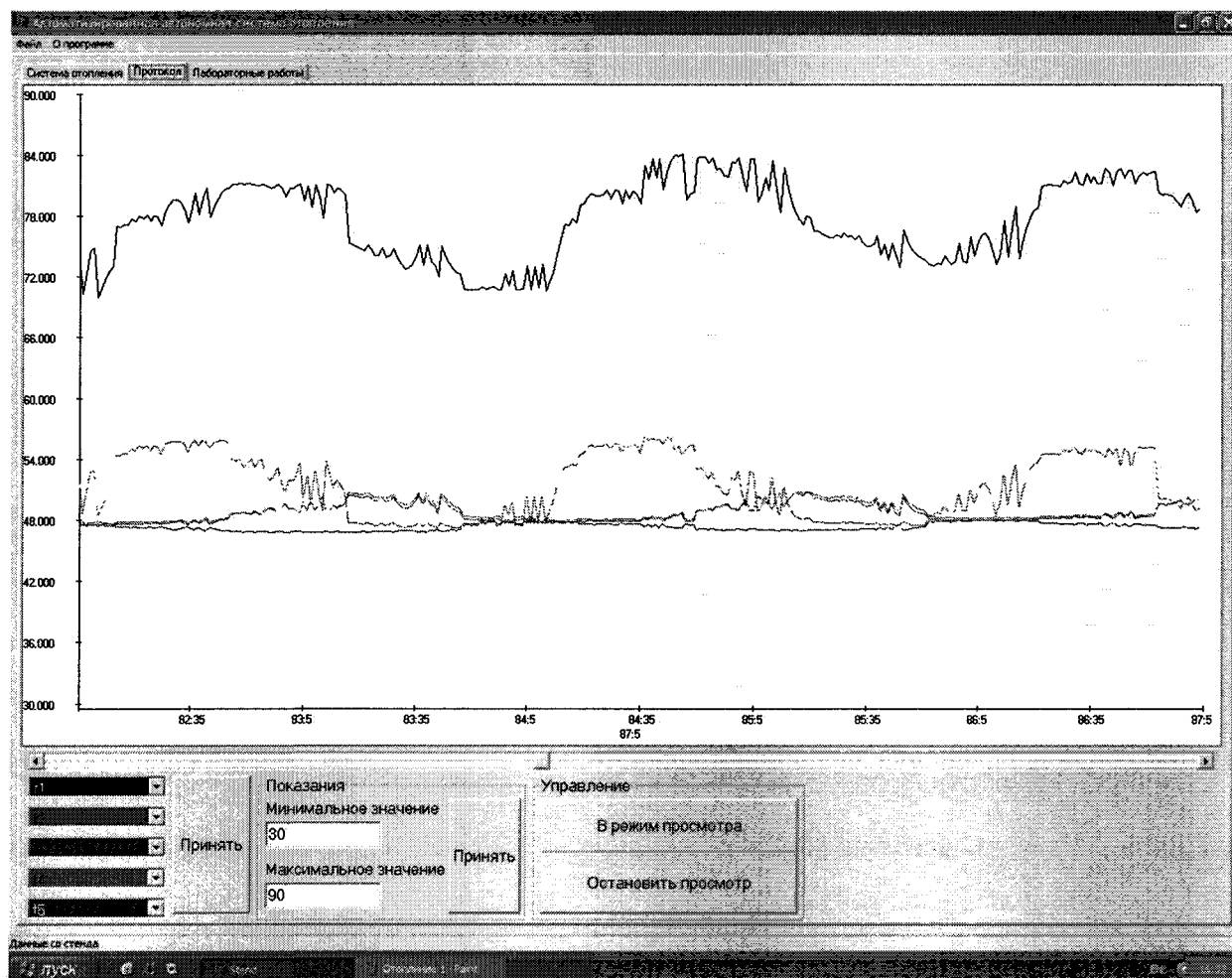


Рис. 4. Интерфейс управляющей программы. «Окно протокола работы»

Датчик 19 (ТЕ5) измеряет температуру теплоносителя на выходе из ОП2 («нижнего» при последовательном включении), без учета теплоносителя протекающего через перемычку 15. Датчик 20 (ТЕ6) измеряет температуру на выходе из ОП2 (нижнего при последовательном включении), с учетом теплоносителя протекающего через перемычку 15. Она же равна температуре теплоносителя на выходе обоих отопительных приборов при последовательном включении. При параллельном включении показания ТЕ3 и ТЕ4 равны, соответственно равны и регистрируемые значения температур по датчикам ТЕ5 и ТЕ6 вследствие их последовательного включения.

Датчик 21 (ТЕ7) измеряет температуру окружающего воздуха в отапливаемом помещении.

Далее теплоноситель, прошедший через отопительные приборы проходит через крыльчатый модернизированный счетчик-расходомер «ВСКМ 90-15» – 24, предназначенный для измерения «общего» расхода теплоносителя, устанавливаемый посредством вентилей 23 (при этом возмущающее воздействие определяется ручными вентилями 14). Расходомер 24 выполнен на базе счетчика горячей воды и дополнен устройством электронно-оптического съема информации. Цена импульса соответствует расходу 11,11 грамма теплоносителя. После фильтра 25 теплоноситель поступает на вход циркуляционного насоса 22 – «GRUNDFOS UPS 25-40 В». Проточный фильтр 25, установленный непосредственно перед циркуляционным насосом для очистки теплоносителя от всевозможных частиц, которые могут вывести насос из строя. Используемый циркуляционный насос 22 имеет три скорости вращения. Переключение производится рукояткой расположенной непосредственно на насосе. Необходимый для экспериментов расход теплоносителя устанавливается регулятором 23 и переключателем циркуляционного насоса.

На панели стенда расположены также шаровой кран со штуцером, проточный фильтр и обратный клапан 26, используемые при заправке стенда теплоносителем. Здесь же, в нижней точке системы, установлен кран для слива теплоносителя из системы со сливным шлангом 27.

Установка может комплектоваться сосудом для хранения, заправки или слива теплоносителя, а также насосом 28 с подвесом и шлангом для заправки системы под давлением.

На панели стенда расположен пульт управления 29, в котором находятся (слева направо):

- устройство защитного отключения (УЗО);
- автомат включения/выключения теплогенератора;
- автомат включения/выключения циркуляционного насоса, цепей питания датчиков и автоматического регулятора температуры;
- автомат включения/выключения сдвоенной розетки 220 В для подключения системного блока ПЭВМ и монитора (расположена на задней стенке панели);

– автомат включения/выключения одинарной розетки 220 В для подключения заправочного насоса 28 (расположена на задней стенке панели).

Питание стенда осуществляется через однофазную розетку с защитным проводником, рассчитанную на ток не менее 15 А.

В режиме реального времени на экране монитора отображаются результаты работы управляющей программы (см. рис. 3). Для удобства ее интерфейс выполнен в виде контура установки со всеми компонентами и органами управления, с опциональным вводом/отображением входных и выходных параметров на мониторе.

Схема подключения отопительных приборов определяется состоянием трехходовых кранов КР2 и КР1, которые в начале работы со стендом необходимо установить в требуемое положение.

Затем, для приведения управляющей программы и схемы на экране в соответствие состоянию стенда, с помощью мыши на экране монитора следует установить нижнее положение соответствующих указателей. Для каждой конкретной схемы соединения отопительных приборов на экране автоматически стрелками указывается направление движения теплоносителя и обновляется задание на вычисление мощности ОП1 и ОП2. Рядом с датчиками температуры отображается текущее значение температуры и ее приращение за последнюю минуту эксперимента. Вся информация обновляется ежесекундно.

Рядом с расходомером на мониторе выводится текущее значение расхода теплоносителя. Значение расхода теплоносителя усредняется за последние 20 секунд эксперимента.

С окна на рис. 3 производится также управление исполнительным УС. Выбор значения заданной температуры на выходе регулятора и зоны неопределенности производится с раскрывающихся окон.

С помощью кнопок «АВТО» и «РУЧНОЕ» можно установить соответствующий режим работы регулятора. В режиме «АВТО» текущее значение команд управления отображается положением переключателя находящегося рядом. Этим же переключателем производится управление регулятором в ручном режиме. Переключатель имеет три положения «ВВЕРХ», «ВНИЗ» и нейтральное. При переходе из автоматического режима в ручной, по умолчанию выдается команда «СТОП».

При работе программы автоматически производится расчет и вывод на экран текущей тепловой мощности Q_1 и Q_2 отопительных приборов ОП1 и ОП2 по формуле

$$Q_i = cG(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}),$$

где $c = 4,187$ кДж/(г·°С) – удельная теплоемкость теплоносителя; G – расход теплоносителя, г/сек; $t_{\text{вх}}$ и $t_{\text{вых}}$ – температуры на входе и выходе из отопительного прибора, °С. Регистрация последних производится посредством датчиков ТЕ2 – ТЕ5,

Инженерное оборудование зданий и сооружений

соответственно автоматически для конкретного способа подключения, относительно чего и определяется текущее значение мощности Q_i .

Все измеряемые, рассчитываемые параметры установки и команды управления непрерывно фиксируются в ПЭВМ и по окончании работы могут быть сохранены в файл, либо просматриваться в виде протокола (см. рис. 4). Так для просмотра на экран могут быть выведены одновременно до 5 графиков. Выбор цвета и параметра выводимого этим цветом может производиться в пяти раскрывающихся окнах. После выбора цветов и параметров выводимых на экран необходимо нажать кнопку «Принять».

Для удобства наблюдений на вкладке «Показания» можно ввести минимальную и максимальную границы значений отображаемых параметров в абсолютных единицах. График параметра выходящий за границы отображения в этом случае будет ограничен.

После ввода значений на вкладке «Показания» необходимо нажать кнопку «Принять». Нажав кнопку «Начать просмотр» можно перейти к наблюдению процессов в режиме реального времени, и наоборот («Остановить просмотр»). Для возможности просмотра «истории» предыдущего характера изменения процесса необходимо нажать кнопку «В режим просмотра», и с помощью горизонтальной полосы прокрутки «откатить» время в требуемое значение.

В строке состояний всегда обозначен источник отображаемых показаний «Данные со стенда» или «Данные с файла».

Программа позволяет сохранить всю информацию эксперимента в файл. По мере накопления файлов, ненужные могут быть удалены любым файловым менеджером.

Во вкладке «Лабораторные работы» содержится методический материал, позволяющий проводить практические исследования по курсам «Отопление», «Теплотехнические измерения и приборы» и «Автоматизация систем теплоснабжения» с использованием данного комплекса, а именно следующий ряд основных процедур:

- экспериментальное определение номинальной мощности отопительного прибора, его удельных характеристик;

- реализация качественно-количественного метода регулирования мощности отопительного прибора;

- экспериментальное исследование качества автоматического регулирования температуры теплоносителя и получаемого при этом качества переходного процесса;

- исследование тепловых характеристик отопительной установки при подключении приборов по параллельной/последовательной схеме.

При дополнительной комплектации (использование переходных фитингов) возможно подключение любого типа отопительных приборов с возможностью проведения тепло-гидравлических испытаний для определения всех необходимых характеристик, в частности, для оценки номинальной мощности (номинального теплового потока) в соответствии с ГОСТ 20849–94 и ГОСТ 8690–94.

К ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ

Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов

Рассматриваются варианты структуры математической модели отопительного прибора. Оценено качественное и количественное различие моделей. Отмечены специфические особенности моделей, позволяющие улучшить управление процессами системы теплоснабжения.

Вопросы создания математической модели отопительного прибора рассматривались в работах многих авторов. Так, в зависимости от способа определения его мощности (теплового потока) выделяют ряд функциональных зависимостей, составляющие параметры которых могут быть известны явным образом или определены с учетом некоторых допущений [1].

По-видимому, исторически первой математической моделью отопительного прибора является широко известное уравнение для определения его мощности:

$$Q_o = K(0,5(t_{ax} + t_{вых}) - t_g)F, \quad (1)$$

где K и F – коэффициент теплопередачи и площадь поверхности отопительного прибора; t_{ax} и $t_{вых}$ – температура теплоносителя на входе в прибор и выходе из него; t_g – температура воздуха в помещении.

Уравнение содержит как входные переменные t_{ax} и t_g , так и выходную переменную $t_{вых}$.

Следует отметить интересную особенность, что в литературе по расчету систем отопления неявным образом считается, что зависимость температуры теплоносителя от F является линейной функцией. На это указывает то, что среднее значение температурного напора для отопительного прибора принято вычислять по формуле:

$$\bar{\Delta t} = \frac{t_{ax} + t_{вых}}{2} - t_g. \quad (2)$$

Формула (2) будет давать точное значение среднего температурного напора только в том случае, если температура теплоносителя вдоль F будет распределяться по прямой и будет при этом знакопостоянной функцией. В самом деле, хорошо известно, что средняя температура теплоносителя определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= \frac{1}{F} \int_0^F t(F) dF = \frac{1}{F} S_{TP} = \frac{1}{F} \cdot \frac{t(0) + t(F)}{2} \cdot F = \\ &= 0,5(t_{ax} + t_{вых}), \end{aligned} \quad (3)$$

где S_{TP} – площадь прямолинейной трапеции, образованной линейной знакопостоянной зависимостью $t(F)$ и осью абсцисс на отрезке $[0; F]$, что

подтверждает справедливость вышеприведенного замечания по поводу вычисления $\bar{\Delta t}$ по формуле (2).

При расчете любого теплообменного аппарата неизвестные составляющие могут быть определены из уравнений теплопередачи или теплового баланса. Не является исключением и отопительный прибор, для которого

$$Q_o = cG(t_{ax} - t_{вых}), \quad (4)$$

где c и G – теплоёмкость и массовый расход теплоносителя.

Таким образом, решая уравнения (1) и (4), найдем *первый вариант структуры статической модели* отопительного прибора, представляющийся следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o1} = \frac{cG(t_{ax} - t_g)}{0,5 + \frac{cG}{KF}}; \\ t_{вых} = t_{ax} - \frac{Q_o}{cG}, \end{cases} \quad (5)$$

для которой на рис. 1 приведена структурная схема отопительного прибора.

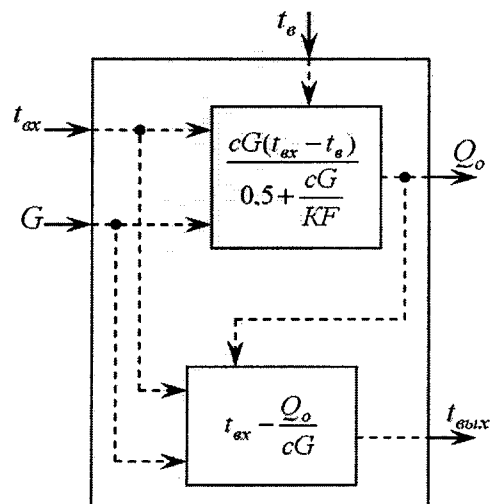


Рис. 1. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (5)

На рис. 1 t_{ax} , t_g и G – входные переменные; при этом t_{ax} и G являются управляющими воз-

Инженерное оборудование зданий и сооружений

действиями, соответственно t_g следует отнести к категории возмущений.

Для отыскания другого варианта структуры математической модели выделим бесконечно малый участок площади поверхности отопительного прибора и запишем уравнение теплового баланса для этого участка [2]:

$$-Gcdt = K(t - t_g)dF, \quad (6)$$

где t – температура теплоносителя в пределах участка dF .

Если считать коэффициент теплопередачи постоянным, то уравнение (6) будет представлять собой уравнение с разделяющимися переменными, которое можно представить в виде:

$$\frac{dt}{t - t_g} = -\frac{K}{Gc}dF. \quad (7)$$

Решая (7) с учетом того, что $t(0) = t_{ax}$, получим

$$t(F) = t_g + (t_{ax} - t_g) \cdot \exp\left(-\frac{KF}{Gc}\right). \quad (8)$$

Уравнение (8) описывает изменение температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена при постоянном коэффициенте теплопередачи и если F вся поверхность теплообмена, то $t(F) = t_{вых}$.

Используя уравнение (8), нетрудно найти выражение для мощности отопительного прибора, очевидно, что это величину следует определять по уравнению:

$$Q_o = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ax} - t_g).$$

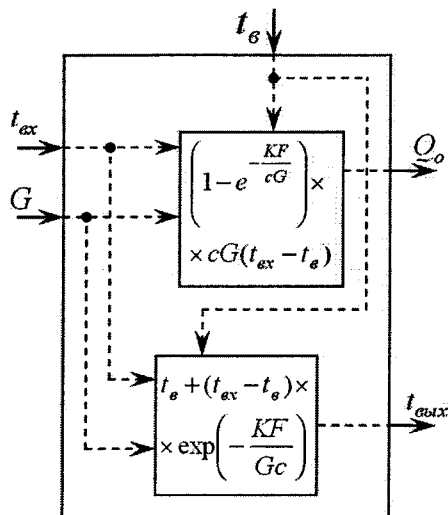


Рис. 2. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (9)

Таким образом, второй вариант структуры статической модели отопительного прибора представляется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o2} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ax} - t_g); \\ t_{вых} = t_g + (t_{ax} - t_g) \cdot \exp\left(-\frac{KF}{Gc}\right). \end{cases} \quad (9)$$

Структурная схема модели отопительного прибора в этом случае представлена на рис. 2.

С другой, стороны из теории рекуперативных теплообменных аппаратов (ТО), работающих, например, по схеме «противоток», известно, что мощность теплообменника следует вычислять по формуле:

$$Q_{mo} = \varepsilon \cdot cG_1(t_{1ax} - t_{2ax}),$$

где t_{1ax} и t_{2ax} – температуры первичного и вторичного теплоносителя на входе в теплообменник; cG_1 – эквивалент расхода первичного теплоносителя; ε – коэффициента эффективности ТО, определяемый по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-\frac{KF}{cG_1} \left[\frac{cG_1}{cG_2} - 1\right]}}{1 - \frac{cG_1}{cG_2} e^{-\frac{KF}{cG_1} \left[\frac{cG_1}{cG_2} - 1\right]}}, \quad (10)$$

где cG_2 – эквивалент расхода вторичного теплоносителя.

Применительно к отопительному прибору следует считать, что cG_1 – эквивалент расхода воды, протекающий через прибор (cG), а cG_2 – эквивалент расхода воздуха, омывающего отопительный прибор, который во много раз больше cG_1 . Учитывая это, получим выражение для коэффициента эффективности ОУ:

$$\varepsilon_o = 1 - e^{-\frac{KF}{cG}}. \quad (11)$$

Параметр ε_o позволяет определять мощность ОУ через большую разность температур теплообменивающихся сред

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG(t_{ax} - t_g), \quad (12)$$

откуда совместное решение с уравнением (11), позволяет получить зависимость, полностью совпадающую с уравнением статики (9):

$$Q_{o2} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}}\right) cG(t_{ax} - t_g).$$

Уравнение (9) удобно использовать для расчета конкретного отопительного прибора. Если же рассматривать в целом всю систему отопления, то удобно перейти к параметрам теплоносителя в тепловой сети, так как температурный график в наружных сетях обычно выше, чем установленный для отопительной установки (ОУ). Поэтому структуру модели (9) на рис. 2 можно дополнить схемой узла смешения (рис. 3).

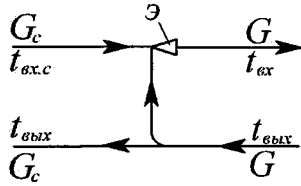


Рис. 3. Схема узла смешения перед системой отопления

На рис. 3 смесительным устройством является водоструйный элеватор (Э), перед которым «средствами автоматики» [3] установлен расход сетевой воды G_c с температурой $t_{ex.c} > t_{ex}$. Физический смысл перехода с температурного режима наружных сетей на температурный график системы отопления определяется через уравнение неразрывности струи посредством вычисления коэффициента смешения

$$u = \frac{t_{ex.c} - t_{ex}}{t_{ex} - t_{вых}} = \frac{G - G_c}{G_c} \quad (13)$$

Выразим температуру воды на входе в ОУ t_{ex} через коэффициент смешения с учетом (5)

$$t_{ex} = t_{ex.c} - u \frac{Q_o}{cG},$$

подставив которую в (5) для Q_{o1} получим следующую модификацию уравнения статики, позволяющую находить мощность отопительного прибора через разность температур теплообменивающихся сред:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG(t_{ex.c} - t_g), \quad (14)$$

откуда коэффициент эффективности равен

$$\varepsilon_o = \frac{1}{0,5 + u + \frac{cG}{KF}} \quad (15)$$

При совпадении установленных температурных графиков в системе отопления и тепловых сетях необходимость устройства узла смешения отпадает, то есть $u = 0$, тогда коэффициент эффективности примет вид:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{0,5 + \frac{cG}{KF}} \quad (16)$$

откуда ясно, что при подстановке (16) в (12) также перейдем к виду структуры статической модели (5).

Из рис. 3 и уравнения (13) следует, что $G = (1 + u)G_c$. С учетом этого мощность ОУ можно представить следующим выражением:

$$Q_o = \varepsilon_o \cdot cG_c(t_{ex.c} - t_g), \quad (17)$$

где коэффициент эффективности соответственно равен

$$\varepsilon_o = \frac{1}{\frac{0,5 + u}{1 + u} + \frac{cG_c}{KF}} \quad (19)$$

Таким образом, для систем отопления, подключенных по зависимой схеме с температурным графиком ниже, чем в тепловой сети удобно использовать уравнение (17) для определения мощности системы отопления в целом, где достаточно

знать только установленные входные параметры и значение коэффициента смешения.

Для получения третьего варианта структуры статической модели отопительного прибора учтем зависимость коэффициента теплопередачи от среднего значения температурного напора и расхода. Как известно [4] эта зависимость имеет вид:

$$K = m\Delta t^n \bar{G}^p, \quad (20)$$

где m , n и p – экспериментальные числовые показатели, зависящие от типа прибора и характера циркуляции в нем воды; Δt – текущий температурный напор; \bar{G} – относительный расход воды.

Подставив соотношение (20) в уравнение (6), а затем, проинтегрировав, найдем выражение для вычисления текущего температурного напора отопительного прибора:

$$\Delta t = t - t_g = \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}.$$

Откуда зависимость температуры теплоносителя от площади поверхности F , очевидно, будет представляться следующим уравнением:

$$t(F) = t_g + \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (21)$$

позволяющим определить $t_{вых}$ при конкретном значении F .

В работе [2] построены кривые распределения температуры теплоносителя вдоль площади поверхности отопительного прибора для различных значений расхода, из которых видно, что формулы (8) и (21) дают практически одинаковое распределение температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена. Различие становится существенным только при больших значениях F и малых значениях расхода теплоносителя.

Формулы (8) и (11) точнее учитывают физику процесса, поэтому предпочтение следует отдавать данным соотношениям, чем общепринятому положению о том, что распределение температуры теплоносителя вдоль поверхности отопительного прибора имеет линейный характер [4].

С помощью уравнения (21) можно получить третье уравнение статики для определения Q_o :

$$Q_o = cG \left[t_{ex} - t_g - \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}} \right].$$

Таким образом, третий вариант структуры статической модели отопительного прибора представляется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} Q_{o3} = cG \left[t_{ex} - t_g - \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}} \right]; \\ t_{вых} = t_g + \left(\frac{mn}{Gc} \cdot \bar{G}^p F + (t_{ex} - t_g)^{-n} \right)^{\frac{1}{n}}. \end{cases} \quad (22)$$

Инженерное оборудование зданий и сооружений

Структурная схема модели отопительного прибора в этом случае представлена на рис. 4.

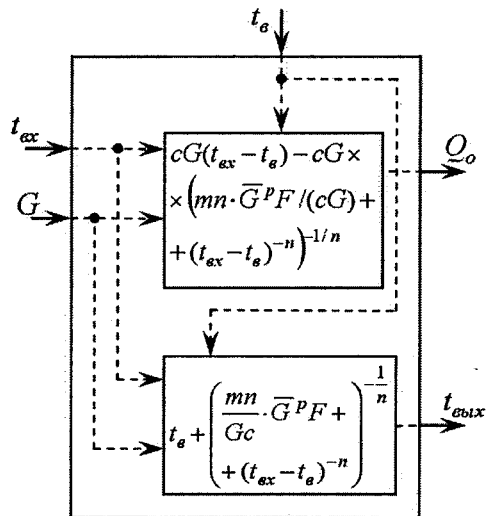


Рис. 4. Структурная схема статической модели отопительного прибора для системы уравнений (22)

Вместе с тем интересно также оценить и количественное различие моделей. Для примера рассмотрим структуры модели из уравнений (5) и (9). Откуда видно, что отношение мощностей отопительного прибора Q_{o2}/Q_{o1} определяется следующим выражением:

$$\frac{Q_{o2}}{Q_{o1}} = \left(1 - e^{-\frac{KF}{cG}} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{cG}{KF} \right). \quad (23)$$

Как видно из (23) отношение мощностей является функцией параметра $KF/(cG)$. Представим последний за X и исследуем поведение функции Q_{o2}/Q_{o1} в зависимости от X , для чего проведем прямые вычисления (см. таблицу).

Результаты вычислений Q_{o2}/Q_{o1} по формуле (23)

Q_{o2}/Q_{o1}	0,999992	0,694934	0,599873
KF/cG	0,01	5,01	10,01
Q_{o2}/Q_{o1}	0,566622	0,549975	...
KF/cG	15,01	20,01	...
Q_{o2}/Q_{o1}	0,50010	0,50005	0,50003
KF/cG	10000,0	20000,0	30000,0
Q_{o2}/Q_{o1}	0,50003	0,50002	...
KF/cG	40000,0	50000,0	...

Как видно из таблицы с увеличением параметра KF/cG отношение мощностей уменьшается. Для построения графика функции $Q_{o2}/Q_{o1} = f(X)$ найдем предельные значения этой функции при X стремящемся к бесконечности и к нулю справа:

$$\lim_{X \rightarrow +\infty} \frac{Q_{o2}}{Q_{o1}} = \lim_{X \rightarrow +\infty} \left\{ \left(1 - e^{-X} \right) \cdot \left(0,5 + \frac{1}{X} \right) \right\} = 0,5. \quad (24)$$

Для вычисления второго предела функции применим правило Лопитала

$$\lim_{X \rightarrow +0} \left\{ \frac{1 - e^{-X}}{0,5X + 1} \right\} = \lim_{X \rightarrow +0} \left\{ \frac{e^{-X}}{1} \right\} = \frac{1}{1} = 1. \quad (25)$$

Таким образом, график функции $(Q_{o2}/Q_{o1}) = f(X)$ будет иметь вид, приведенный на рис. 5.

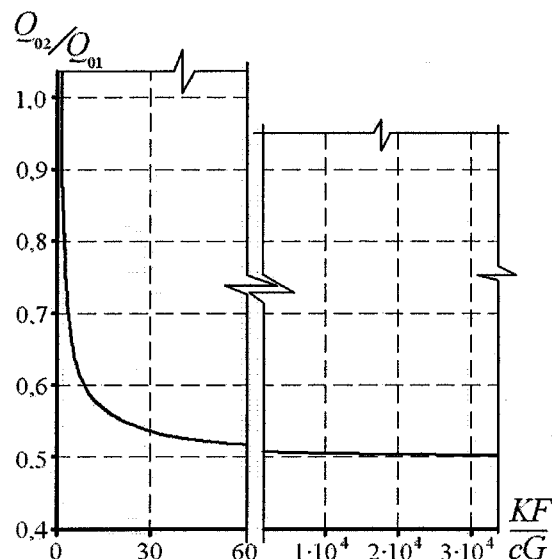


Рис. 5. Графики функции Q_{o2}/Q_{o1}

Из рис. 5 видно, при малых значениях параметра $KF/(cG)$, то есть при больших расходах теплоносителя, варианты модели (5) и (9) практически равноценны. При больших значениях этого параметра, имеющих место, очевидно, при малых расходах, мощность отопительного прибора, вычисленная по второму варианту структуры будет в 2 раза меньше, чем мощность найденная по первому варианту структуры. Поэтому при прочих равных условиях температурные графики регулирования, построенные на основе первого варианта, уравнение (5), будут располагаться ниже графиков, построенных на основе второго варианта – уравнение (9). А поскольку физика процесса теплопередачи точнее учитывается вторым вариантом модели чем первым, то теплоснабжение зданий, рассчитанное на основе первого варианта модели (в настоящее время используется именно этот подход) будет приводить к тому, что количество доставленной потребителю тепла не восполнит его тепловую потребность, обусловленную потерями тепла через ограждающие конструкции.

Анализ данных работы [2] говорит о том, что графики распределения температуры теплоносителя вдоль поверхности теплообмена F , вычисленные по второму, и третьему вариантам структуры математической модели, практически одинаковы и, очевидно, что при использовании этих структур

погрешность в определении теплоотдачи отопительного прибора будет менее значимой.

Вместе с тем это не означает, что одинаковыми будут и вычисленные значения мощностей Q_{o2} и Q_{o3} , — формулы (9) и (22), поэтому необходимо выяснить какое количественное различие дают эти формулы.

На рис. 6 приведены графики для относительных значений мощностей отопительного прибора, определенные по всем трем вариантам структуры математической модели для различных входных температур теплоносителя (80, 85 и 95 °С). Указанные на рис. 6 кривые позволяют провести анализ по сходимости результатов расчета между структурами уравнений (5), (9) и (22).

За базовое (расчетное) значение мощности Q_o^p отопительного прибора использовалась величина 1536 Вт, найденная стандартным образом [4] для 10-секционного отопительного прибора М 140 АО. Здесь индекс i означает номер варианта структу-

ры. За базовое (расчетное) значение расхода G^p была взята величина 0,015 кг/с, температурный график 95–70 °С.

Расчет проводился методом последовательных приближений путем увеличения расхода теплоносителя и нахождения Q_{oi} — до достижения величины, отвечающей значению Q_o^p . Подписи осей абсцисс и ординат обусловлены отношением текущего значения к расчетному, соответственно мощности отопительного прибора и расхода теплоносителя.

Так, сплошные кривые построены по первому уравнению статики (5), пунктирные по второму уравнению статики (9), а сплошные кривые, обозначенные «ромбами», по третьему уравнению статики (22).

Как видно из рис. 6 сплошные и пунктирные кривые практически схожи при данных значениях температуры теплоносителя на входе в отопительный прибор. Такая близость справедлива, так как в

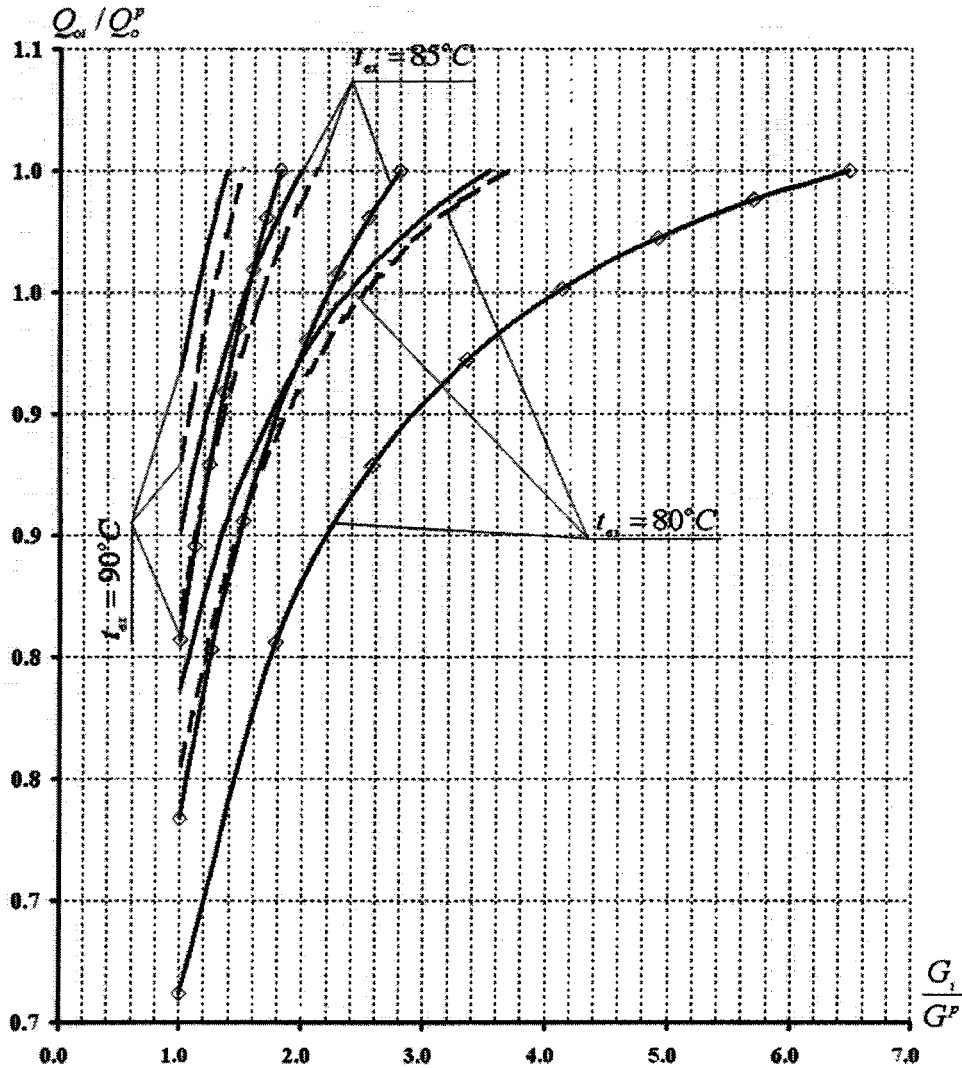


Рис. 6. Кривые изменения мощности отопительного прибора от расхода для различных значений входной температуры теплоносителя

структуру уравнений (5) и (9) входит коэффициент теплопередачи, изменение которого не учитывается.

В то же время, кривые, построенные по уравнению (22) отличаются от остальных и учитывают изменения коэффициента теплопередачи во всем диапазоне регулирования. Наиболее явно различие просматривается при значительном снижении t_{ax} , например до 85 °С, когда для достижения расчетного значения мощности расход необходимо увеличить в 6 раз.

Выводы

Из структурных схем математической модели отопительного прибора видна близость уравнений статики для первого и второго варианта, соответственно по сравнению с третьим вариантом. Причем в большей степени она определяется постоянством значения коэффициента теплопередачи.

Вместе с тем практическая значимость определяется включением в искомые уравнения расчетных значений расходов. В этом случае количественное различие между первым и вторым вариантами становится существенным.

Также видно, что при высоких входных температурах и практически реальных диапазонах измене-

ния расхода мощности Q_{o2} и Q_{o3} практически одинаковы. Следовательно, при управлении процессом теплоснабжения необходимо учитывать и эту особенность, в частности, при качественно-количественном регулировании, и установить целесообразность использования первого варианта структуры статической модели отопительного прибора.

Литература

1. Монахов, В.Г. Моделирование управления режимами тепловых сетей / В.Г. Монахов, Ю.А. Войтинская. – М.: Энергоиздат, 1995. – 224 с.
2. Денисенко, Ю.Н. К проблеме построения математических моделей отопительного прибора / Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов. – Материалы Второй Международной науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2007. – С. 101–106.
3. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. – 472 с.
4. Богословский, В.Н. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 1: Отопление / В.Н. Богословский. – М.: Стройиздат. – 1990. – 344 с.

ПРИВЕДЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ К ОДНОСЛОЙНЫМ ПРИ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТАХ

Ю.С. Васильев, Д.В. Крестьянкин, А.Н. Нагорная, В.И. Панферов

Рассмотрен вопрос приведения многослойных ограждений к однослойным при выполнении тепловых расчетов. Выполнен анализ состояния рассматриваемого вопроса в науке на сегодняшний период времени. Предложен алгоритм приведения двух и трехслойных однослойным и определения эквивалентного коэффициента температуропроводности. Для реализации данного алгоритма предлагается разработанное программное обеспечение. Для примера приводится расчет двух и трехслойной стеновой панели, приводятся графики распределения температур по толще ограждений.

В настоящее время в современном строительстве широкое применение находят слоистые ограждающие конструкции: стеновые панели, покрытия, ограждения для тепловыделяющих агрегатов, теплоизоляционные конструкции различных систем и т.д.

Применение различных материалов, образующих многослойные конструкции, вызывают необходимость широко заниматься не только их теплофизическими свойствами, но и расчетами температурных полей при разнообразных факторах теплового воздействия. Задача определения температуры в теле ограждающей конструкции представляет интерес как с точки зрения определения прогревания конструкции, так и при выборе наиболее благоприятной схемы расположения неоднородных слоев относительно друг друга.

При расчете тепловых режимов помещений обычно принимается, что теплотехнические характеристики материалов и воздуха практически не зависят от температуры и редко от пространственной координаты. Поэтому обычно ограничиваются моделью в виде линейного дифференциального уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами. Однако при рассмотрении многослойной конструкции необходимо решать уравнение теплопроводности для каждого слоя и стыковать их между собой на границе слоев, используя граничные условия 4-го рода. Вследствие чего процесс решения оказывается достаточно сложным. В связи с этим, можно добиться значительного упрощения расчетов, если найти возможность приведения многослойных конструкций к однослойным.

Решением данной задачи занимались и ранее. В работе Б.Ф. Шкурко и В.П. Начаева [1]

разрабатывается инженерный метод расчета плоских многослойных конструкций. В основу метода положена идея о приближенном приведении теплофизических характеристик материалов многослойных конструкций к эквивалентным характеристикам однослойных. Условия эквивалентности, на основе которых можно получить выражения для определения эквивалентных теплофизических характеристик материалов многослойных конструкций, зависят от условий теплообмена и целей расчета.

В работе авторами были найдены наиболее рациональные условия, которые применимы для выполнения расчетов процесса теплообмена при рассматриваемом граничном условии и обеспечивают меньшую погрешность. К ним относятся: условия равенства температур поверхностей одно- и двухслойных конструкций и условие равенства скоростей изменения температурных режимов одно- и двухслойных конструкций.

В результате реализации этих условий получены зависимости, позволяющие рассчитать эквивалентные значения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности. Однако для численного нахождения данных величин необходимо предварительно определить эмпирические коэффициенты. С этой целью предлагается использовать приведенные в работе графические зависимости. Вследствие чего, предложенный метод нельзя назвать универсальным. Кроме того, представленный метод разработан только для двухслойной стенки.

В.А. Макагонов в своей работе [2] предлагает выражение среднего значения величины коэффициента температуропроводности для многослойной конструкции

$$a_y = \sum_{i=1}^n a_i / n, \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где n – число слоев в конструкции.

Очевидно, что предложенное выражение весьма упрощенное, и может использоваться только для приближенных расчетов температурных полей.

Для нахождения общей условной толщины конструкции автор выразил поперечный размер условных слоев через первый слой при условии равенства коэффициента теплопроводности для каждого слоя

$$h_y = \left(1 + \sum \frac{h_i}{h_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_i}} \right) h_1 \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i / n a_1}.$$

Таким образом, вместо многослойной конструкции была получена однослойная с условными значениями a_y и h_y .

Сложнее обстоит задача с нахождением распределения температуры в теле конструкции. Для этих целей В.А. Макогонов использовал метод приведения.

Математическая формулировка задачи включает уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия. Далее автор переходит к безразмерному виду и, используя операционный метод, находит решение задачи в изображениях. Затем выполняется переход от изображения функций к их оригиналам, в результате чего с помощью условий приведения записывается выражения для распределения температуры в приведенной однослойной конструкции.

Используя предложенное выражение достаточно трудоемко получить численные значения температур, а ошибка вычисления, по словам автора, составляет около 12 % при малых значениях критерия Fo ; при увеличении критерия ошибка также возрастает.

Таким образом, вопрос приведения многослойных ограждающих конструкций к однослойным поднимается достаточно часто при выполнении тепловых расчетов ограждений. Это связано с тем, что решение теплотехнических задач для каждого слоя в отдельности и дальнейшая стыковка их между собой является весьма сложной и трудоемкой процедурой. Как правило, требуется найти эквивалентные характеристики для однослойных ограждений, а также распределение температуры по толщине, при условии, что поведение приведенной однослойной конструкции будет совпадать с поведением многослойной. Однако, как видно из рассмотренных работ, поставленная задача в настоящее время остается окончательно нерешенной; авторами не представлен алгоритм приведения многослойных ограждающих конструкций к однослойным, а лишь показывается возможность построения такого алгоритма.

Известно, что решение уравнения теплопроводности можно представить в виде ряда Фурье по собственным функциям. Поведение решения на

бесконечности определяется первым членом ряда Фурье, который убывает как экспонента. В таком случае можно принять в качестве эквивалентной однослойной модели такую модель, в которой порядок убывания первого члена совпадает с порядком убывания первого члена для многослойной стенки. Исходя из данного предположения, получили алгоритм для определения эквивалентного коэффициента теплопроводности.

Для того чтобы приводить многослойные конструкции к однослойным, выясним, как записывается решение в виде ряда Фурье для однослойной стенки и каков характер убывания первого члена в разложении для однослойной стенки.

Решение любой линейной задачи теплопроводности выписывается в виде ряда Фурье, состоящего из собственных функций решения однородной задачи [3]. Температурное поле внутри ограждающей конструкции описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где t – температура в ограждающей конструкции; τ – время; x – координата; a – теплопроводность материала стенки.

Граничные условия у правой и левой поверхности стенки:

$$t|_{x=0} = 0; \quad t|_{x=l} = 0. \quad (2)$$

Решение задачи методом Фурье после разделения переменных будет иметь вид:

$$\frac{T'_\tau}{T} = a \frac{X''_{xx}}{X}.$$

Левая часть уравнения может зависеть только от времени или быть постоянным числом, но она не зависит от координаты. Правая часть может зависеть только от координаты или быть постоянным числом, но она не зависит от времени. Равенство должно иметь место при любых значениях времени и координат. Это возможно только в том случае, если правая и левая части равенства равны некоторой постоянной величине D . Постоянная D выбирается из физических соображений. Для тепловых процессов, стремящихся к температурному равновесию, когда по истечении длительного промежутка времени ($\tau \rightarrow \infty$) должно установиться определенное распределение температуры, величина D не может быть положительной величиной, она будет только отрицательной [3].

Положим $D = -k^2$, где k – некоторая положительная постоянная, которая определяется из граничных условий. Тогда

$$T(\tau) = C e^{-k^2 \tau};$$

$$a \frac{X''_{xx}}{X} = -k^2.$$

Характеристическое уравнение для определения значения k имеет вид:

$$\sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}}l\right) = 0.$$

Собственное значение числа k

$$k_n = \frac{\sqrt{a}\pi n}{l}.$$

Общее решение задачи, представленной уравнениями (1)–(2) записывается в виде:

$$t(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-k_n^2 \tau} B_n \sin\left(\frac{k_n}{\sqrt{a}}x\right).$$

Характер убывания определяется множителем при времени в показателе экспоненты первого члена ряда

$$k_1 = \frac{\sqrt{a}\pi}{l}, \quad (3)$$

поэтому в дальнейшем будем считать эквивалентными стенками такие, у которых эти множители в показателях совпадают.

Таким образом, будем приравнять порядки убывания решений многослойных конструкций к параметру k_1 , и из полученного равенства находить коэффициент теплопроводности эквивалентной однослойной стенки.

От однослойной перейдем к двухслойной стенке. Выведем уравнения, с помощью которых по известным характеристикам двухслойной стенки можно определить эквивалентный параметр теплопроводности a однослойной стенки. Эти уравнения можно определить из соответствующей однородной краевой задачи для двухслойной стенки.

Температурное поле внутри ограждающей конструкции описывается уравнением (1), где коэффициент теплопроводности материала стенки изменяется в следующем диапазоне:

$$a = \begin{cases} a_1, & 0 \leq x \leq l_1; \\ a_2, & l_1 < x \leq l_1 + l_2, \end{cases}$$

где l_1, l_2 – толщина первого и второго слоя ограждения.

Граничные условия у правой и левой поверхности ограждающей конструкции:

$$t|_{x=0} = 0; \quad t|_{x=l_1+l_2} = 0. \quad (4)$$

В точке соприкосновения слоев выполняются условия 4-го рода:

$$t|_{x=l_1-0} = t|_{x=l_1+0}, \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l_1-0} = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l_1+0}, \quad (7)$$

где λ_1, λ_2 – теплопроводность материала первого и второго слоя ограждения.

Характеристическое уравнение для определения собственного значения k имеет вид:

$$\frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a_2}}l_2\right) \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a_1}}l_1\right) +$$

$$+ \frac{\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a_2}}l_2\right) \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a_1}}l_1\right) = 0.$$

Собственных значений k , удовлетворяющих этому уравнению, бесконечно много. Частными решениями поставленной задачи будут

$$t_n(x, \tau) = \begin{cases} e^{-k_n^2 \tau} B_{1n} \sin\left(\frac{k_n}{\sqrt{a_1}}x\right), & 0 \leq x \leq l_1; \\ e^{-k_n^2 \tau} \left(A_{2n} \cos\left(\frac{k_n}{\sqrt{a_2}}x\right) + B_{2n} \sin\left(\frac{k_n}{\sqrt{a_2}}x\right) \right), & l_1 < x \leq l_1 + l_2, n \in N. \end{cases}$$

Тогда общее решение записывается в виде:

$$t(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} t_n(x, \tau).$$

Порядок убывания определяется слагаемым, в котором показатель в экспоненте наименьший, т.е. $t_1(x, \tau)$. Положим $\beta = k_1$. Тогда для определения эквивалентных параметров однослойной стенки следует, зная параметры двухслойной стенки найти наименьшее положительное β удовлетворяющее уравнению

$$\frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cos\left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}}l_2\right) \sin\left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}}l_1\right) + \frac{\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \sin\left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}}l_2\right) \cos\left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}}l_1\right) = 0 \quad (8)$$

и приравнять его к параметру однослойной стенки k , определяемому по выражению (3).

Для нахождения наименьшего собственного значения, необходимо отделить данный корень. Промежуток отделения $[\beta_1, \beta_2]$ первого корня уравнения (8) определяется согласно следующему алгоритму:

$$\text{если } \frac{l_1}{\sqrt{a_1}} \geq \frac{l_2}{\sqrt{a_2}}, \text{ тогда } \beta_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{a_1}}{l_1},$$

$$\beta_2 = \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_1}}{l_1}; \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{a_2}}{l_2} \right\};$$

$$\text{если } \frac{l_1}{\sqrt{a_1}} < \frac{l_2}{\sqrt{a_2}}, \text{ тогда } \beta_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{a_2}}{l_2},$$

$$\beta_2 = \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_2}}{l_2}; \frac{\pi}{2} \frac{\sqrt{a_1}}{l_1} \right\}.$$

Алгоритм получения характеристик однослойной стенки по заданным характеристикам двухслойной

Имеется ограждающая конструкция, состоящая из двух слоев. Первый слой имеет толщину l_1 . Материал первого слоя ограждающей конструкции

имеет теплопроводность λ_1 , плотность ρ_1 , теплоемкость c_1 . Второй слой имеет толщину l_2 . Материал второго слоя ограждающей конструкции имеет теплопроводность λ_2 , плотность ρ_2 , теплоемкость c_2 .

Требуется получить эквивалентную однослойную стенку толщины $l = l_1 + l_2$, то есть найти эквивалентный параметр a . Исходя из вышеизложенного можно выписать следующий алгоритм.

1. Положить ширину однослойной стенки $l = l_1 + l_2$.

2. Если $\frac{l_1}{\sqrt{a_1}} \geq \frac{l_2}{\sqrt{a_2}}$, положить

$$[\beta_1, \beta_2] = \left[\frac{\pi \sqrt{a_1}}{2 l_1}, \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_1}}{l_1}; \frac{\pi \sqrt{a_2}}{2 l_2} \right\} \right],$$

иначе

$$[\beta_1, \beta_2] = \left[\frac{\pi \sqrt{a_2}}{2 l_2}, \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_2}}{l_2}; \frac{\pi \sqrt{a_1}}{2 l_1} \right\} \right].$$

3. Найти корень β уравнения на интервале $[\beta_1, \beta_2]$.

$$\frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cos \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \right) \sin \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \right) + \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_2} \sin \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \right) \cos \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \right) = 0.$$

4. Температуропроводность материала эквивалентной однослойной стенки вычислить по формуле $a = \left(\frac{\beta \cdot l}{\pi} \right)^2$.

Разработка программных средств

Для реализации полученного алгоритма составлена программа 2layers.m в математическом пакете Matlab [4], которая работает по следующему алгоритму:

1) определение констант:

– теплопроводности λ_1 , плотности ρ_1 , теплоемкости c_1 , толщины l_1 первого слоя ограждающей конструкции;

– теплопроводности λ_2 , плотности ρ_2 , теплоемкости c_2 , толщины l_2 материала второго слоя конструкции;

– температуры воздуха внутри помещения и ограждающей конструкции;

– длительности моделируемых процессов T ;

2) вычисление ширины эквивалентной стенки $l = l_1 + l_2$;

3) если $\frac{l_1}{\sqrt{a_1}} \geq \frac{l_2}{\sqrt{a_2}}$, полагается

$$[\beta_1, \beta_2] = \left[\frac{\pi \sqrt{a_1}}{2 l_1}, \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_1}}{l_1}; \frac{\pi \sqrt{a_2}}{2 l_2} \right\} \right],$$

иначе

$$[\beta_1, \beta_2] = \left[\frac{\pi \sqrt{a_2}}{2 l_2}, \min \left\{ \pi \frac{\sqrt{a_2}}{l_2}; \frac{\pi \sqrt{a_1}}{2 l_1} \right\} \right];$$

4) нахождение корня β уравнения

$$f(\beta) = \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_1} \cos \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \right) \sin \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \right) + \frac{\sqrt{a_1}}{\lambda_2} \sin \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \right) \cos \left(\frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \right) = 0$$

на интервале $[\beta_1, \beta_2]$;

5) вычисление коэффициента температуропроводности a по формуле $a = \left(\frac{\beta \cdot l}{\pi} \right)^2$;

6) решение задачи теплопроводности для однослойной стенки с коэффициентом температуропроводности a неявной разностной схемой;

7) решение задачи теплопроводности для двухслойной ограждающей конструкции неявной разностной схемой;

8) построение графиков распределения температуры внутри стенок через 1, 6, 12, 24 часа.

Пример использования алгоритма

Имеется ограждающая конструкция, состоящая из двух слоев.

Первый (внутренний) слой имеет толщину $l_1 = 0,1$ м и состоит из пустотного керамического кирпича, имеющего следующие теплотехнические показатели: теплопроводность $\lambda_1 = 0,47$ Вт/(м·°С), теплоемкость $c_1 = 880$ Дж/(кг·°С), плотность $\rho_1 = 1600$ кг/м³.

Второй (наружный) слой имеет толщину $l_2 = 0,4$ м и состоит из силикатного кирпича, имеющего следующие теплотехнические показатели: теплопроводность $\lambda_2 = 0,7$ Вт/(м·°С), теплоемкость $c_2 = 880$ Дж/(кг·°С), плотность $\rho_2 = 1800$ кг/м³.

Температура воздуха внутри помещения постоянна и равна 21 °С.

Температура наружного воздуха изменяется по периодическому закону

$$t_n(\tau) = 20 - 5 \sin \left(2\pi \frac{\tau}{24 \cdot 3600} \right),$$

где τ – время в секундах.

В начальный момент времени температура внутри стенки на всем протяжении равна 21 °С.

Вычислим коэффициент температуропроводности эквивалентной однослойной по представленному алгоритму: $a = 3,8319 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Построим графики распределения температуры внутри стенки. На всех графиках сплошной

линией обозначается распределение температуры внутри двухслойной стенки, штрихпунктирной линией – распределение температуры внутри однослойной стенки с коэффициентом температуропроводности a (рис. 1–4).

На графиках видно, что способ вычисления коэффициента температуропроводности эквивалентной однослойной стенки дает хорошее приближение к двухслойной стенке.

Используя аналогичный подход разработан алгоритм приведения трехслойной стенки к однослойной и вычисление эквивалентного коэффици-

ента температуропроводности. Для реализации алгоритма написана программа 3layers.m в математическом пакете Matlab [4], логическая структура которой следующая:

1) определение констант:

– теплопроводности λ_1 , плотности ρ_1 , теплоемкости c_1 , толщины l_1 первого слоя ограждающей конструкции;

– теплопроводности λ_2 , плотности ρ_2 , теплоемкости c_2 , толщины l_2 материала второго слоя конструкции;

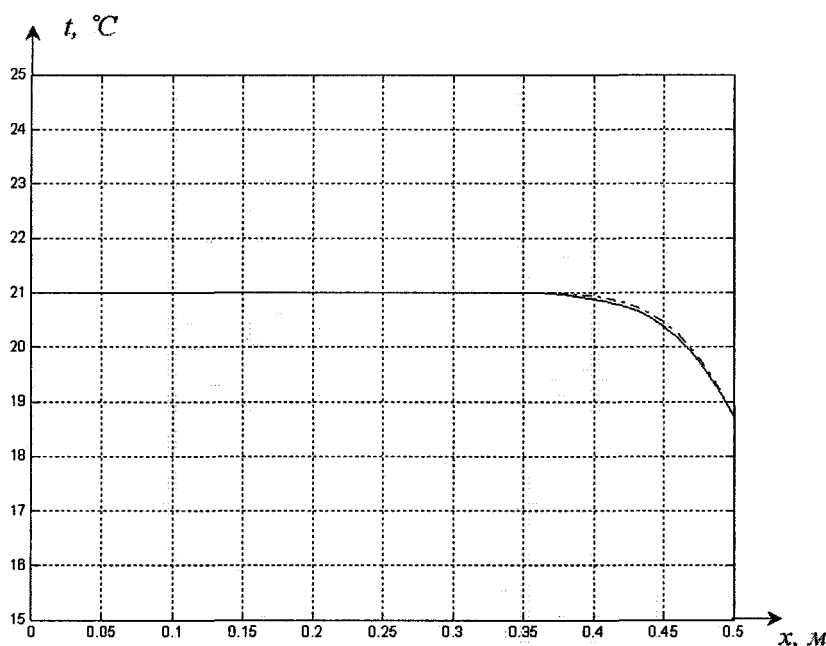


Рис. 1. График распределения температуры внутри двухслойной стенки в момент времени $\tau = 1$ ч

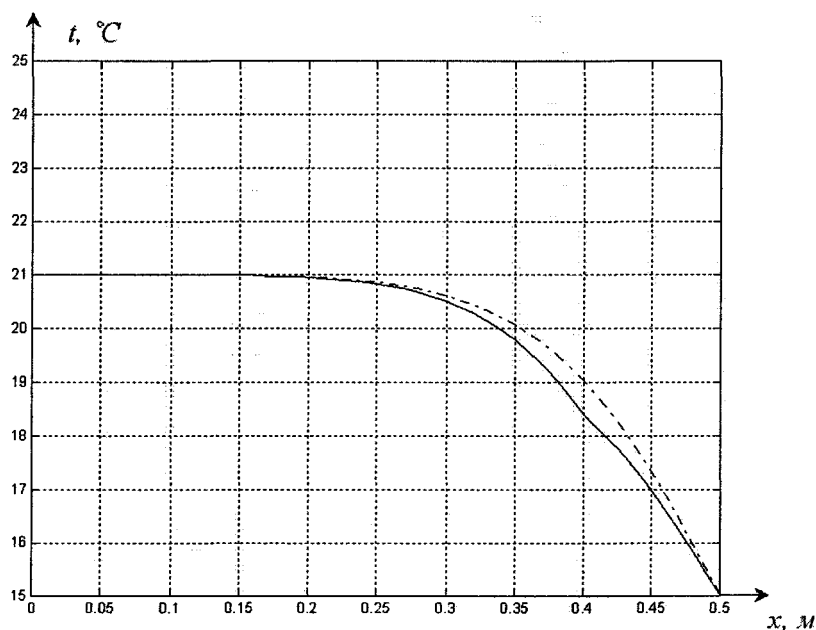


Рис. 2. График распределения температуры внутри двухслойной стенки в момент времени $\tau = 6$ ч

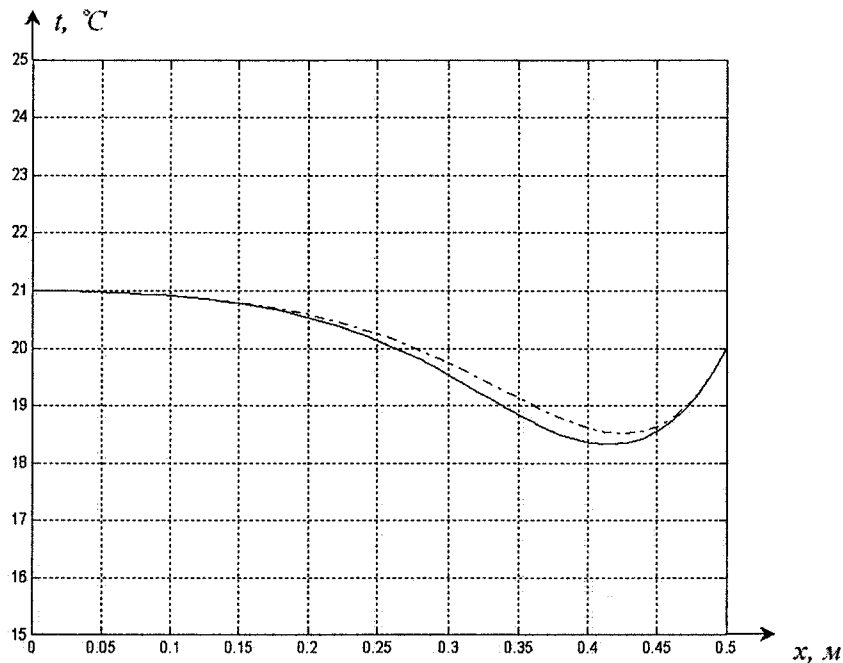


Рис. 3. График распределения температуры внутри двухслойной стенки в момент времени $\tau = 12$ ч

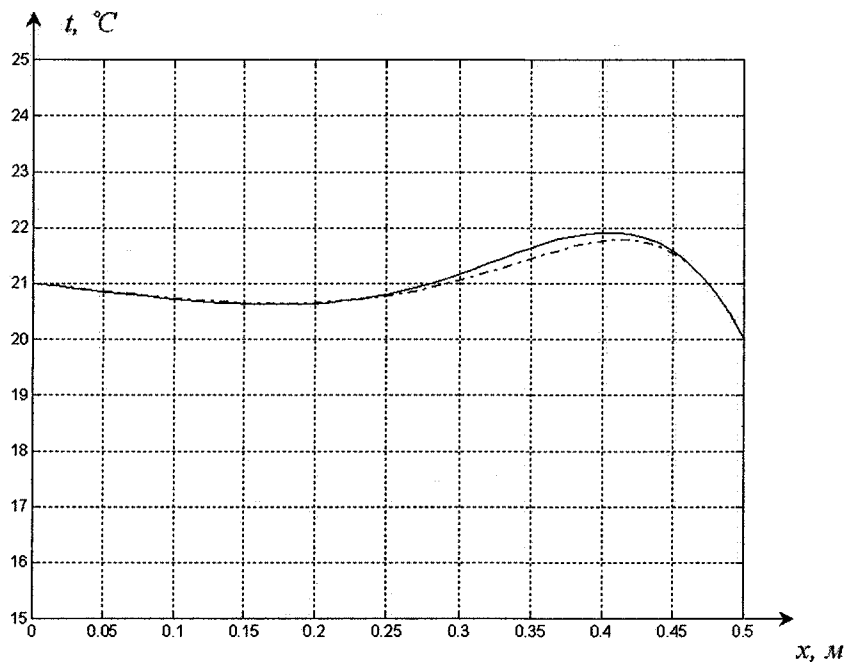


Рис. 4. График распределения температуры внутри двухслойной стенки в момент времени $\tau = 24$ ч

– теплопроводности λ_3 , плотности ρ_3 , теплоемкости c_3 , толщины l_3 материала третьего слоя конструкции;

– температуры воздуха внутри помещения и ограждающей конструкции;

– длительности моделируемых процессов T ;

2) вычисление ширины эквивалентной стенки $l = l_1 + l_2 + l_3$;

3) вычисление промежутка отделения корня $[\beta_1, \beta_2]$;

4) нахождение корня β уравнения

$$f(\beta) = \lambda_2 \lambda_3 \sqrt{a_1} \sqrt{a_2} \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_3}} l_3 + \lambda_1 \lambda_3 a_2 \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_3}} l_3 +$$

$$+\lambda_1 \lambda_2 \sqrt{a_2} \sqrt{a_3} \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \cos \frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_3}} l_3 -$$

$$-\lambda_2^2 \sqrt{a_1} \sqrt{a_3} \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_1}} l_1 \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_2}} l_2 \sin \frac{\beta}{\sqrt{a_3}} l_3 = 0$$

на интервале $[\beta_1, \beta_2]$;

5) вычисление коэффициента теплопроводности a по формуле $a = \left(\frac{\beta \cdot l}{\pi} \right)^2$;

б) решение задачи теплопроводности для од-

нослойной стенки с коэффициентом теплопроводности a неявной разностной схемой;

7) решение задачи теплопроводности для трехслойной ограждающей конструкции неявной разностной схемой;

8) построение графиков распределения температуры внутри стенок через 1, 6, 12, 24 часа.

Пример реализации алгоритма

Имеется ограждающая конструкция, состоящая из трех слоев.

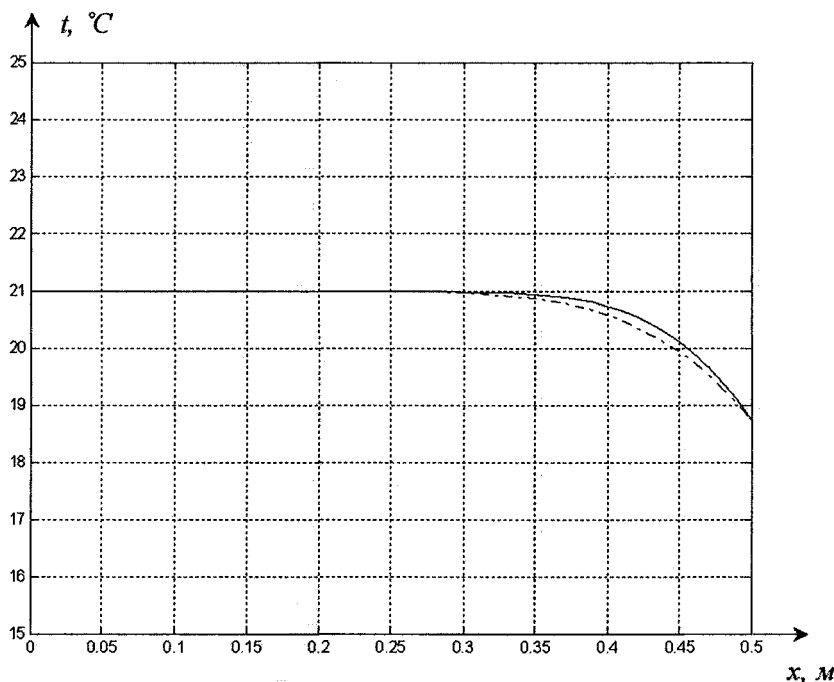


Рис. 5. График распределения температуры внутри трехслойной стенки в момент времени $\tau = 1$ ч

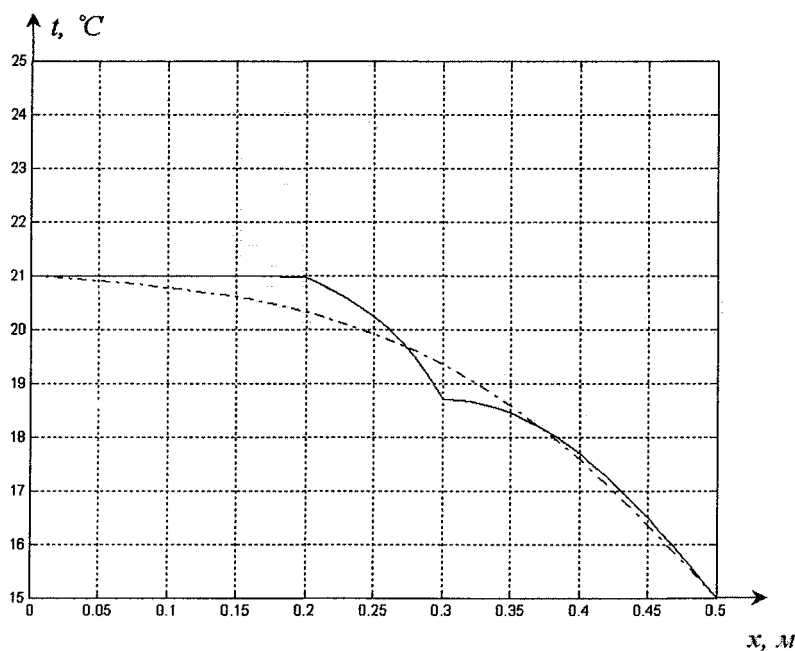


Рис. 6. График распределения температуры внутри трехслойной стенки в момент времени $\tau = 6$ ч

Инженерное оборудование зданий и сооружений

Первый (внутренний) слой имеет толщину $l_1 = 0,2$ м и состоит из железобетона, имеющего следующие теплотехнические показатели: теплопроводность $\lambda_1 = 1,69$ Вт/(м·°C), теплоемкость $c_1 = 840$ Дж/(кг·°C), плотность $\rho_1 = 2500$ кг/м³.

Второй (промежуточный) слой имеет толщину $l_2 = 0,1$ м и состоит из пенополистирола, имеющего следующие теплотехнические показатели: теплопроводность $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·°C), теплоемкость $c_2 = 1340$ Дж/(кг·°C), плотность $\rho_2 = 150$ кг/м³.

Третий (наружный) слой имеет толщину

$l_3 = 0,2$ м и состоит из железобетона, имеющего следующие теплотехнические показатели: теплопроводность $\lambda_3 = 1,69$ Вт/(м·°C), теплоемкость $c_3 = 840$ Дж/(кг·°C), плотность $\rho_3 = 2500$ кг/м³.

Температура воздуха внутри помещения постоянна и равна 21°С.

Температура наружного воздуха изменяется по периодическому закону

$$t_n(\tau) = 20 - 5 \sin\left(2\pi \frac{\tau}{24 \cdot 3600}\right),$$

где τ – время в секундах.

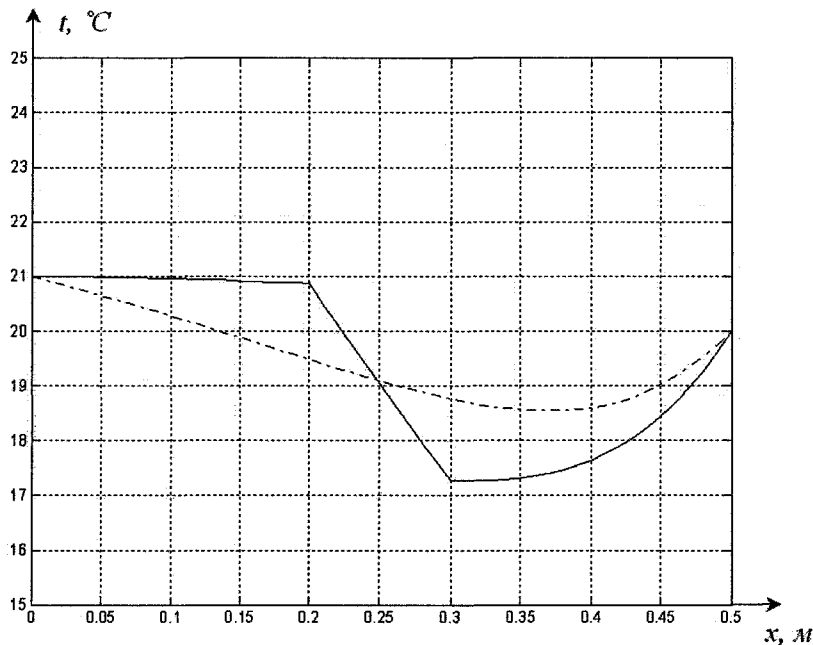


Рис. 7. График распределения температуры внутри трехслойной стенки в момент времени $\tau = 12$ ч

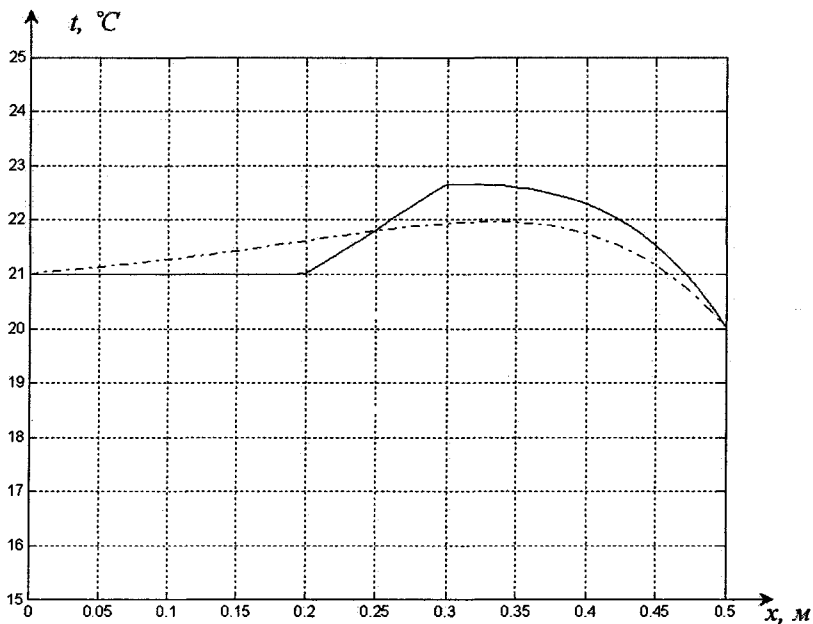


Рис. 8. График распределения температуры внутри трехслойной стенки в момент времени $\tau = 24$ ч

В начальный момент времени температура внутри стенки на всем протяжении равна 21 °С.

Вычислим коэффициент теплопроводности эквивалентной однослойной по представленному алгоритму: $a = 1,1886 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Построим графики распределения температуры внутри стенки. На всех графиках сплошной линией обозначается распределение температуры внутри трехслойной стенки, штрихпунктирной линией – распределение температуры внутри однослойной стенки с коэффициентом теплопроводности a (рис. 5–8).

На полученных графиках видно, что поведение построенной по алгоритму эквивалентной однослойной ограждающей конструкции похоже на поведение многослойной.

Литература

1. Шкурко, Б.Ф. К вопросу инженерного теплового расчета конструкций / Б.Ф. Шкурко, В.П. Нечаев // Изв. вузов. Серия «Строительство и архитектура». – 1985. – № 3. – С. 93–96.
2. Макагонов, В.А. О возможности приведения многослойных конструкций к однослойным при тепловых расчетах / В.А. Макагонов // Изв. вузов. Серия «Строительство и архитектура». – 1974. – № 4. – С. 137–140.
3. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с.
4. Кондрашов, В.Е. MATLAB как система программирования научно-технических расчетов / В.Е. Кондрашов. – М.: Мир, 2002. – 350 с.

Сведения об авторах

АНИСИМОВА Елена Юрьевна – старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплового режима зданий.

БАЙБУРИН Альберт Халитович – канд. техн. наук, профессор кафедры «Технология строительного производства» ЮУрГУ.

Область научных интересов: контроль, оценка и управление качеством в строительстве; проектирование строительных технологий гарантированного качества; повышение эффективности технологических процессов; раннее нагружение монолитных железобетонных конструкций в зимних условиях.

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Прикладная математика» ЮУрГУ.

Область научных интересов: применение численных методов решения задач моделирования и оптимизации.

ГУСЕВА Наталья Владимировна – аспирант кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: действительная работа стальных конструкций зданий и сооружений, моделирование и испытание стальных строительных конструкций.

ДЕНИСЕНКО Юрий Николаевич – аспирант кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование процессов управления тепло-гидравлическими режимами в системах теплоснабжения.

ЗИМИЧ Вита Васильевна – аспирант кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: изучение сульфомагнезиального вяжущего и создание строительных материалов на их основе.

ИВАШЕНКО Юлий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: исследование, проектирование, обследование, усиление и испытание железобетонных конструкций, разработка методов испытания конструкций.

КАЛЯГИН Георгий Илларионович – директор НПИ «Учебная техника и технологии» ЮУрГУ.

Область научных интересов: разработка учебно-лабораторной техники.

КОЗЬМИН Николай Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: исследование действительной работы и оценка технического состояния конструкций зданий и сооружений, компьютерные технологии решения инженерных задач, компьютерное моделирование работы конструкций под нагрузкой.

КРАМАР Дмитрий Михайлович – начальник отдела ТСО ЮУрГУ.

Область научных интересов: разработка учебно-лабораторной техники.

КРАМАР Людмила Яковлевна – д-р техн. наук, доцент кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: магнезиальные вяжущие вещества, исследования в области водонепроницаемости и морозостойкости строительных материалов.

КРЕСТЬЯНКИН Дмитрий Владимирович – инженер по программному обеспечению ООО «Беркут», г. Челябинск.

Область научных интересов: разработка программного обеспечения для решения прикладных задач.

МАКСИМОВ Юрий Васильевич – канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: техническое обследование и реконструкция зданий и сооружений.

НАГОРНАЯ Анастасия Николаевна – старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: математическое моделирование, исследование тепловых режимов при отоплении зданий.

НИКОНОВ Станислав Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология строительного производства» ЮУрГУ.

Область научных интересов: контроль и оценка качества строительно-монтажных работ, вероятностно-статистические методы в проектировании строительных технологий.

ПАНФЕРОВ Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплотехнических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

РАКИТИН Борис Андреевич – аспирант кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения», ЮУрГУ.

Область научных интересов: методы расчета железобетонных труб для прокладки подземных трубопроводов.

САБУРОВ Валерий Федорович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: исследование действительной работы и оценка технического состояния стальных конструкций зданий и сооружений, усталостная прочность и прогнозирование ресурса стальных конструкций зданий и сооружений, моделирование и испытания стальных строительных конструкций.

СИБРИКОВА Марина Анатольевна – доцент кафедры «Градостроительство» ЮУрГУ.

Область научных интересов: транспортная система города, принципы формирования городской территории.

СОЛОВЬЕВ Борис Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и инженерные сооружения» ЮУрГУ.

Область научных интересов: подземные сооружения в транспортном строительстве.

СПАСИБОЖКО Владимир Васильевич – канд. техн. наук, профессор кафедры «Строительные материалы», декан архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ.

Область научных интересов: использование техногенного сырья в производстве строительных материалов, изделий и конструкций; техническая и экологическая экспертиза зданий и сооружений и оценка объектов недвижимости.

ТОКАРЕВ Вячеслав Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов – исследование теплофизических процессов в динамических системах.

ТРОФИМОВ Борис Яковлевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы» ЮУрГУ, советник РАН.

Область научных интересов: повышение стойкости железобетонных конструкций путем регулирования структуры бетонов за счет модифицирования продуктов гидратации минерального вяжущего для увеличения их дисперсности и стабильности в условиях агрессивного воздействия внешней среды.

*Подписной индекс Вестника ЮУрГУ,
серия «Строительство и архитектура» 29563,
объединенный каталог «Пресса России».
Периодичность выхода – 2 номера в год.*

*Информация о «Вестнике ЮУрГУ» и требования к оформлению статей
доступны в Интернет по адресу:
<http://www.susu.ac.ru/ru/science/publish/vestnik/>*

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 12 (112) 2008

**Серия
«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»
Выпуск 6**

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 17.04.2008. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,38. Тираж 500 экз. Заказ 99/180.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76