ISSN 2071-4726

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

№2(46) март 2014

СОБЫТИЯ

РАСЧЕТЫ

МЕТОДЫ

АНАЛИЗ

ГИДРАВЛИКА. ТЕПЛОТЕХНИКА. ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ ЗДАНИЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный институт
Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spbstu.ru,
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО, на курсы повышения квалификации (72 часа)

Код	Наименование программы	Виды работ*
	Курсы по строительству	
БС-01-04	«Безопасность и качество выполнения общестроительных работ»	**п.1,2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14**
БС-01	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	**1,2,3,5**
БС-02	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	**6,7**
БС-03	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	**9,10,11**
БС-04	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	**12,13,14**
БС-05	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	**15,16,17,18,19**
БС-06	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	**20,21**
БС-08	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	**23,24**
БС-12	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	**29**
БС-13	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	**30**
БС-14	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	**31**
БС-15	«Осуществление строительного контроля»	**32**
БС-16	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика»	**33**
	Курсы по проектированию	
БП-01	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	**1,2,11**
БП-02	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	**3**
БП-03	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	**4**
БП-04	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	**5**
БП-05	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	**6**
БП-06	«Разработка специальных разделов проектной документации»	**7**
БП-07	«Разработка проектов организации строительства»	**8**
БП-08	«Проектные решения по охране окружающей среды»	**9**
БП-09	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	**10**
БП-10	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	**12**
БП-11	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	**13**
Э-01	«Проведение энергетических обследований с целью повышения энергетической эффективности и энергосбережения»	
	Курсы по инженерным изысканиям	
И-01	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	**1**
И-02	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	**2,5**
И-03	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	**3**
И-04	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	**4**
И-05	«Организация работ по инженерным изысканиям»	**7**

***(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)**

По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении квалификации установленного образца (72 ак. часа)

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: stroikursi@mail.ru.

Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 227А

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Научный редактор:

Николай Иванович Ватин

Литературный редактор:

Елена Викторовна Соболева

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 11.04.14
Формат 60х84/8, усл. печ. л. 8.
Заказ №0817

Отпечатано в типографии СПбГПУ.
СПб, ул. Политехническая, д. 29

Содержание

На обложке: стенд компании «K-FLEX», выставка Интерстройэкспо, Санкт-Петербург, Россия

Контакты:

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: engstroy@inbox.ru Web: Http://www.engstroy.spb.ru

Министерство образования и науки Украины
Харьковская областная государственная администрация
Харьковское областное территориальное отделение
Академии строительства Украины
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ХНУСА)

Международная научно-практическая конференция «Эффективные организационно-технологические решения и энергосберегающие технологии в строительстве» 23-24 апреля 2014 г.

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе Международной научно-практической конференции «Эффективные организационно-технологические решения и энергосберегающие технологии в строительстве», которая состоится 23-24 апреля 2014 г. в Харьковском национальном университете строительства и архитектуры.

Планируется работа секций **по направлениям**:

– архитектурно-конструктивные решения зданий и новые строительные материалы;
– эффективные организационно-технологические решения строительства и реконструкции зданий и сооружений;
– энерго- и ресурсосберегающие технологии в строительстве;
– комплексная механизация строительных процессов.

Рабочие языки конференции: украинский, русский, английский.

Продолжительность доклада на пленарном заседании – до 20 минут. Продолжительность секционного доклада – до 10 минут.

Порядок работы конференции:
23 апреля 2014 г.
10^{00} – 13^{00} – Регистрация участников.
13^{00} – 15^{30} – Пленарное заседание.
24 апреля 2014 г.
13^{00}- 16^{00} – Работа конференции по секциям.
16^{00} – Закрытие конференции.

Материалы научных докладов будут опубликованы в сборнике тезисов конференции.

Кроме тезисов участники конференции могут опубликовать статью (5-12 стр.) в «Науковому віснику будівництва», условия публикации в котором есть на сайте университета (www.kstuca.kharkov.ua).

Адрес оргкомитета конференции:
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры,
ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина.

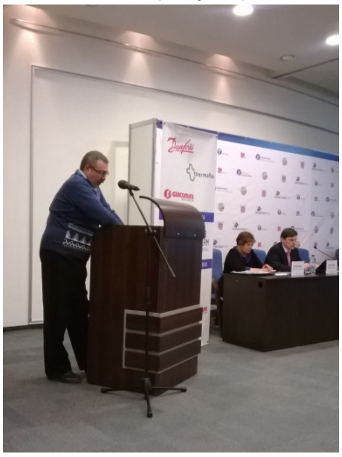
Телефоны для справок:
+38057 706 18 54 – кафедра технологии строительного производства
+38097 941 33 28 – Шумаков Игорь Валентинович
+38066 829 83 24 – Говоруха Инна Викторовна
+38057 700 06 51 – Эйдумова Тамара Исааковна

E-mail: kstuca-tbv@ukr.net

Конференция АВОК

11 апреля в Ленэкспо проходила XVI конференция АВОК «Эффективные системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплоснабжения». На конференции было множество докладов производителей оборудования для инженерных систем зданий. Все они рассказывали о новейшем оборудовании, призванном привнести комфорт в здания, повысить энергосбережение, сократить затраты и повысить эффективность производства. Помимо обсуждения конкретного оборудования, было несколько докладов, посвященных более общим проблемам проектирования, монтажа и эксплуатации инженерных сетей.

Доклад Алексея Станиславовича Вавилова, начальника отдела сопровождения новой продукции ООО «АРКТОС», был посвящен новому Межгосударственному стандарту «Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общетехнические условия», в разработке которого он принимал участие. Подобный стандарт принимается в России впервые, раньше эта область не регулировалась. Стандарт сейчас находится на стадии согласования, вступление в силу планируется 1 января 2015 г. По словам докладчика, в стандарте впервые объединены отечественный и зарубежный подходы к расчету воздухораспределителей: учитывается и скорость и температура воздушного потока, и дальнобойность струи. Во многом стандарт гармонизирован с европейским: в частности, классификация воздухораспределителей полностью соответствует принятой в Европе.



В стандарте выделены характеристики трех групп: конструктивные, аэродинамические и акустические. Все эти характеристики, полученные на специально аттестованных стендах, производители должны будут указывать в технической документации. Характеристики представляются в табличном и графическом виде, примеры представления есть в стандарте.

Одним из важных плюсов принятия нового стандарта А.С. Вавилов считает принятие единой терминологии в отношении воздохораспределителей. Помимо данного стандарта, разработаны также два документа на лабораторные испытания воздухораспределителей: для перемешивающей и вытесняющей вентиляции.

Большое внимание на конференции было уделено системам кондиционирования. Так, Алексей Николаевич Огибалов, руководитель учебного центра по системам кондиционирования воздуха LG Electronics, провел сравнение традиционных систем «чиллер – фанкойл» и систем VRF. Общепринятым является мнение, что системы «чиллер – фанкойл» не имеют альтернатив в зданиях площадью более 1000 м^2. По словам А.Н. Огибалова, это не так: за последние 15 лет системы VRF сильно изменились, и область их применения расширилась. Был приведен пример реального проекта – офисного здания общей площадью более 60 000 м^2, где вместо традиционной системы было принято решение применять VRF. Причинами такой замены стали требования к энергоэффективности, индивидуальному учету электроэнергии и поэтапному вводу помещений в эксплуатацию. По мнению докладчика, таким требованиям более удовлетворяют системы VRF, чем «чиллер – фанкойл».

Доклад А.Е. Плевако, директора по продажам компании Flakt Woods Russia, был посвящен охлаждающим балкам – альтернативе фанкойлу. По мнению выступающего, охлаждающие балки более комфортны для людей, т.к. создают незначительный градиент температур, низкую скорость воздуха, имеют низкие эксплуатационные затраты и низкий уровень шума. Также А.Е. Плевако рассказал об инновации – балках с переменным расходом воздуха и переменной мощностью. Это позволяет системе кондиционирования адаптироваться к тепловой нагрузке в помещении. Тем не менее, докладчик отметил, что любые охлаждающие балки работают без конденсации влаги, поэтому воздух должен быть осушен перед подачей в агрегат.

Михаил Владимирович Самолетов, инженер отдела «Green Lab» ЗАО «Бюро техники», рассказал о другой инновации в этой же области – системе под названием «холодный потолок». Она базируется на фанкойле, закрепленном за подшивным потолком. Таким образом, холодный воздух не поступает сразу в комнату, а сначала распространяется под потолком, затем уже передается в помещение через воздухораспределители. Причем за счет конвекции и радиационного теплообмена от холодной плиты потолка снимается около 40% тепловой нагрузки. По словам докладчика, данная система объединяет преимущества недорогого фанкойла и комфортной охлаждающей панели.

В.М. Якубсон

Численный анализ влияния инженерных сооружений на тепловые потери бесканальных теплопроводов

К.т.н., доцент В.Ю. Половников;
магистрант Е.С. Глазырин,
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования тепловых режимов бесканальных теплотрасс, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, а также численного анализа тепловых потерь рассматриваемых объектов.

Установлены закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе и факторы, влияющие на интенсификацию потерь тепловой энергии. Выявлено, что тепловые потери бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, уменьшаются в диапазоне от 1,53 до 10,79 % в зависимости от температуры внутри инженерного сооружения и геометрических характеристик рассматриваемой системы. Показано, что нормативная методика расчета тепловых потерь бесканальных теплопроводов дает завышенные величины потерь тепловой энергии.

Полученные результаты позволили сделать вывод о перспективности применения разработанного подхода к анализу тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, находящихся в зоне влияния инженерных сооружений, и о возможности его применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

Ключевые слова: математическое моделирование; бесканальные теплопроводы; тепловые потери; инженерные сооружения

Введение

В современной российской [1–4] и зарубежной [5–8] периодической литературе исследованиям по развитию и повышению эффективности систем теплоснабжения посвящено достаточно большое количество работ. При этом особое место занимают работы, связанные с анализом тепловых потерь в тепловых сетях [9–12].

В настоящее время известно [3], что уровень тепловых потерь при транспортировке теплоносителя в тепловых сетях РФ составляет 20–30%, в то время как в других странах он не превышает 6–8% [13]. Основными причинами такого положения являются высокий износ оборудования сетей теплоснабжения [14] и необходимость усовершенствования регламентирующей базы [15]. При этом основным мероприятием по снижению потерь тепла в тепловых сетях является применение перспективных конструкций теплопроводов и высокоэффективной тепловой изоляции [1, 4, 16–19]. Однако реализация этого мероприятия не приведет к устойчивому положительному эффекту без соответствующей корректировки действующих методов проектирования [20] тепловой изоляции теплопроводов различных конфигураций и назначения.

Действующая методика [20] основана на использовании упрощенных аналитических соотношений стационарной теплопроводности и в определенной мере далека от современных подходов к прогностическому моделированию тепловых режимов теплопроводов [11, 12, 17, 21, 22].

Одним из перспективных подходов к исследованию режимов работы теплопроводов в условиях реальной эксплуатации является использование разнообразных коммерческих или открытых пакетов прикладных программ, позволяющих учитывать различные эффекты и процессы, приводящие к интенсификации процессов переноса в рассматриваемых системах. Следует отметить, что за рубежом как минимум 30 лет назад [23] вследствие роста стоимости энергии отказались от использования упрощенных подходов к проектированию тепловой изоляции, и для каждого конкретного объекта с помощью специальных программных продуктов, учитывающих множество факторов, определяются экономически выгодные параметры изоляционной конструкции, вариант ее компоновки и размещения.

Целью работы является математическое моделирование тепловых режимов бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений (тепловые камеры, подвалы зданий), и численный анализ тепловых потерь рассматриваемых объектов в подобных условиях.

Постановка задачи

Рассматривается типичный теплопровод бесканальной прокладки – трубопроводы, изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [24]. Предполагается, что теплопровод эксплуатируется в зоне размещения инженерного сооружения – отапливаемого подвала здания. На рисунке 1 показано схематическое изображение области решения рассматриваемой задачи.

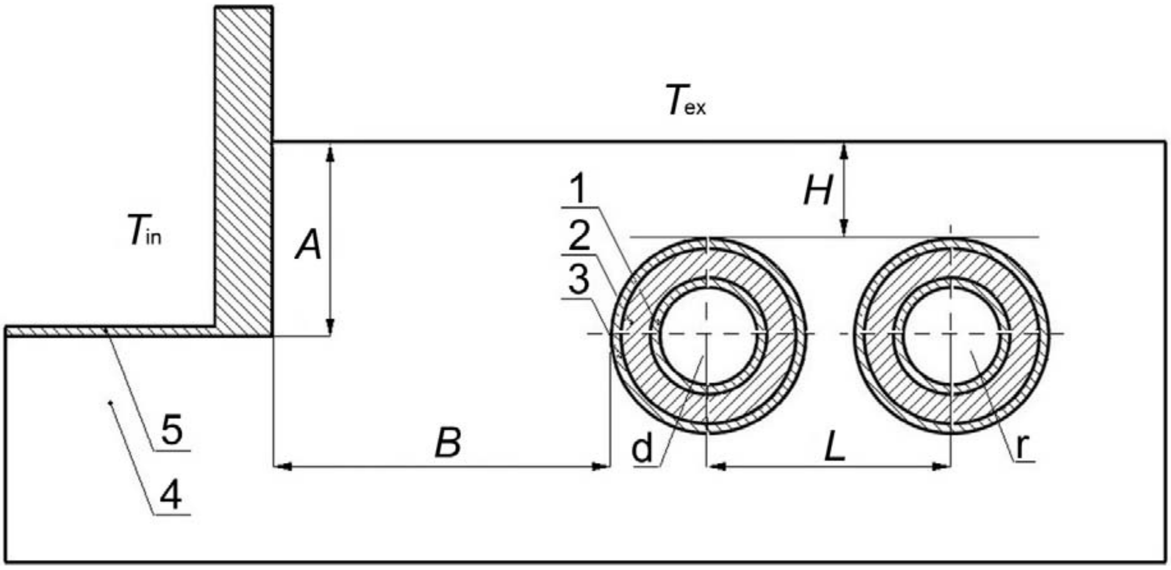


Рисунок 1. Схема поперечного сечения области решения:
1 – металлическая стенка трубы; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – слой гидроизоляции; 4 – грунт; 5 – инженерное сооружение; d, r – подающий и обратный теплопроводы; *H* – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; *L* – расстояние между осями теплопроводов; *A* – заглубление фундамента; *B* – расстояние от крайней точки теплопровода до инженерного сооружения

Для рассматриваемой области (рисунок 1) решается двумерная стационарная задача теплопроводности в системе «подземный бесканальный теплопровод – окружающая среда» с учетом наличия инженерных сооружений в зоне прокладки.

Следует отметить, что решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рисунок 1) не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы теплопроводов наблюдаются только при вводе тепловых сетей в эксплуатацию после плановых или внеплановых остановок и не являются характерными режимами их работы [21, 22].

При постановке задачи приняты следующие допущения.

1. На границах между слоями выполняются условия идеального теплового контакта (рисунок 1).
2. Теплофизические свойства веществ являются постоянными и известными величинами.
3. Не рассматриваются процессы теплопереноса в теплоносителях подающего и обратного трубопроводов.
4. Потери тепла не влияют на температуру внутренней поверхности трубы. Считается, что на внутренней поверхности труб подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам теплоносителей.

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы бесканального трубопровода тепловой сети.

Математическая модель

Математическая модель базируется на традиционных подходах к моделированию физических процессов [11, 12, 21, 22, 25–27] и в предлагаемой постановке будет описываться следующими уравнениями:

$$\nabla^2 T_{d,p} = 0; \quad (1)$$

$$\nabla^2 T_{r,p} = 0; \quad (2)$$

$$\nabla^2 T_{d,i} = 0; \quad (3)$$

$$\nabla^2 T_{r,i} = 0; \quad (4)$$

$$\nabla^2 T_{d,h} = 0; \quad (5)$$

$$\nabla^2 T_{r,h} = 0; \quad (6)$$

$$\nabla^2 T_g = 0; \quad (7)$$

$$\nabla^2 T_f = 0. \quad (8)$$

На внутренних поверхностях подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам теплоносителя в трубах:

$$T_{d,p,1} = T_d = const; \quad (9)$$

$$T_{r,p,1} = T_r = const. \quad (10)$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_p grad(T_{d,p,2}) = \lambda_i grad(T_{d,i,2}); T_{d,p,2} = T_{d,i,2}, \quad (11)$$

$$\lambda_p grad(T_{r,p,2}) = \lambda_i grad(T_{r,i,2}); T_{r,p,2} = T_{r,i,2}, \quad (12)$$

$$\lambda_i grad(T_{d,i,3}) = \lambda_h grad(T_{d,h,3}); T_{d,i,3} = T_{d,h,3}, \quad (13)$$

$$\lambda_i grad(T_{r,i,3}) = \lambda_h grad(T_{r,h,3}); T_{r,i,3} = T_{r,h,3}, \quad (14)$$

$$\lambda_h grad(T_{d,h,4}) = \lambda_g grad(T_{d,g,4}); T_{d,h,4} = T_{d,g,4}, \quad (15)$$

$$\lambda_h grad(T_{r,h,4}) = \lambda_g grad(T_{r,g,4}); T_{r,h,4} = T_{r,g,4}, \quad (16)$$

$$\lambda_g grad(T_{g,5}) = \lambda_f grad(T_{f,5}); T_{g,5} = T_{f,5}. \quad (17)$$

На поверхности разделов «грунт – окружающая среда», «внутренняя поверхность стены – воздух внутри инженерного сооружения», «поверхность пола – воздух внутри инженерного сооружения» и «внешняя поверхность стены – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_g grad(T_{g,6}) = \alpha_6 (T_{g,6} - T_{ex}); \quad (18)$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,7}) = \alpha_7 (T_{f,7} - T_{in}); \quad (19)$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,8}) = \alpha_8 (T_{f,8} - T_{in}); \quad (20)$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,9}) = \alpha_9 (T_{f,9} - T_{ex}). \quad (21)$$

На внешних границах области решения (рисунок 1) градиенты температур равны нулю:

$$grad(T_g) = 0, x \to \pm\infty; y \to -\infty ; \quad (22)$$

$$grad(T_f) = 0, x \to -\infty; y \to +\infty . \quad (23)$$

Обозначения: *Т* – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

Индексы: d – подающий; r – обратный; p – труба; i – изоляция; h – гидроизоляция; g – грунт; f – фундамент; in – внутренний; ex – наружный; 1 – внутренняя поверхность трубы; 2–9 соответственно границы разделов «труба – тепловая изоляция», «тепловая изоляция – гидроизоляция», «гидроизоляция – грунт», «грунт – фундамент», «грунт – окружающая среда», «внутренняя поверхность стены – воздух внутри инженерного сооружения», «поверхность пола – воздух внутри инженерного сооружения», «внешняя поверхность стены – окружающая среда».

Метод решения и исходные данные

Рассматриваемая задача (1)–(23) решена с применением средств и функций пакета программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics с использованием модуля General Heat Transfer [28], базирующегося на решении задач методом конечных элементов [29, 30].

Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, состоящей из 36015 элементов и 18038 узлов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось с использованием подпрограммы Mesh COMSOL Multiphysics [28].

Несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области решения неограниченных размеров (выражения (22), (23)), при проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 7 м по вертикали и 16 м по горизонтали. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Исследования проводились для трубопроводов с наружным диаметром 0,377 м, изготовленных из стали 10 (толщина стенки 0,006 м), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 0,0553 м) [24], покровный слой – полиэтилен толщиной 6,2 мм [24]. Расстояние от поверхности грунта до верхней части теплопроводов составляло *H* = 1,5 м (рисунок 1). Расстояние между осями трубопроводов составляло *L* = 0,65 м. Расстояние *B* от оболочки бесканальной прокладки до фундамента здания, выполненного из железобетона, принималось равным 2 и 5 м (рисунок 1), а заглубление фундамента составляло *A* = 2 м. Температуры внутренней поверхности трубы подающего и обратного теплопровода T_d и T_r принимались равными среднегодовым температурам теплоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей [31], работающих по температурному графику 95/70 ºС. Температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск T_{ex} = 264,35 К [32], а температура воздуха внутри инженерного сооружения составляла T_{in} = 275,15 К и 293,15 К. Согласно [33] коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающих конструкций инженерного сооружения соответственно для стен и пола по грунту составляли α_7 = 8,7 Вт/(м^2·К) и α_8 = 4,5 Вт/(м^2·К), для наружной поверхности – α_9 = 23 Вт/(м^2·К), от грунта к окружающей среде – α_6 = 15 Вт/(м^2·К).

В таблице 1 приведены значения [34] теплопроводности (λ), теплоемкости (C) и плотности (ρ) грунта, фундамента (железобетон), стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении исследований.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов

Материал	Покровный слой	Тепловая изоляция	Стенка трубы	Грунт	Железобетон
λ, Вт/(м·К)	0,33	0,033	50,2	1,5	1,54
***С*, Дж/(кг·К)**	2200	1470	462	1150	887
ρ, кг/м^3	920	50	7700	1960	2200

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного исследования тепловых режимов бесканальных теплопроводов, проложенных в зоне влияния инженерных сооружений, приведены в таблице 2 и на рисунках 2–4.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других авторов [35, 36]. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что является приемлемым при проведении исследований тепловых режимов систем транспортировки тепла.

В таблице 2 приведены значения тепловых потерь q_2 бесканального теплопровода, проложенного в зоне влияния инженерного сооружения (рисунок 1), а также проведено сравнение этих значений с потерями идентичного теплопровода при отсутствии близрасположенных инженерных сооружений q_1 и потерями бесканального теплопровода $q_{норм}$, рассчитанными по нормативной методике [20, 31].

Таблица 2. Результаты численного моделирования (q_1 = 74,74 Вт/м; $q_{норм}$ = 99,50 Вт/м)

***B*, м**	***T*_in, К**	***q*_2, Вт/м**	$\delta_1=\frac{q_1-q_2}{q_1}100\%$	$\delta_2=\frac{q_{норм}-q_2}{q_{норм}}100\%$
5	275,15	73,36	1,85	26,27
	293,15	70,96	5,06	28,68
2	275,15	72,17	3,44	27,47
	293,15	66,68	10,79	32,99

Результаты численного анализа тепловых потерь бесканального теплопровода, приведенные в таблице 2, свидетельствуют об ожидаемом уменьшении тепловых потерь q_2 теплопровода при его прокладке в зоне влияния инженерных сооружений. Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от расстояния между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания позволяет сделать вывод о том, что уменьшение расстояния от 5 до 2 м приводит к снижению тепловых потерь на 1,62 % при температуре внутри инженерного сооружения T_{in} = 275,15 К и на 6,03 % при T_{in} = 293,15 К. Также наблюдается закономерное снижение потерь тепловой энергии с увеличением температуры воздуха внутри инженерного сооружения, в зоне влияния которого расположен теплопровод. При повышении температуры внутри инженерного сооружения от 275,15 до 293,15 К снижение тепловых потерь составляет 3,27 % при расстоянии между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания B = 5 м и на 7,61 % при B = 2 м.

Сопоставление значений q_1 и q_2 (таблица 2) говорит о том, что тепловые потери бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, уменьшаются в диапазоне от δ_1 = 1,53 % до δ_1 = 10,79 % в зависимости от значений T_{in} и B.

Сравнение результатов расчета тепловых потерь бесканального теплопровода, проложенного в зоне влияния инженерного сооружения q_2, с тепловыми потерями $q_{норм}$, полученными с использованием методики [20, 31], свидетельствует о том, что методика [20, 31] дает завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. В предельных случаях отклонение δ_2 составляет от 26,27 до 32,99 %.

На рисунках 2–4 в качестве примеров приведены типичные температурные поля в зоне размещения бесканального теплопровода при отсутствии близрасположенных инженерных сооружений (рис. 2) и при их наличии (рис. 3, 4).

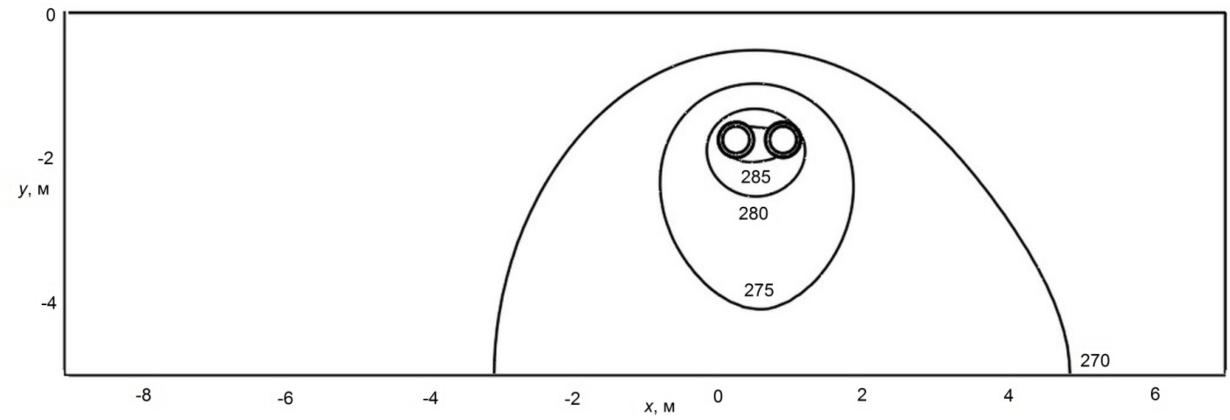


Рисунок 2. Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода

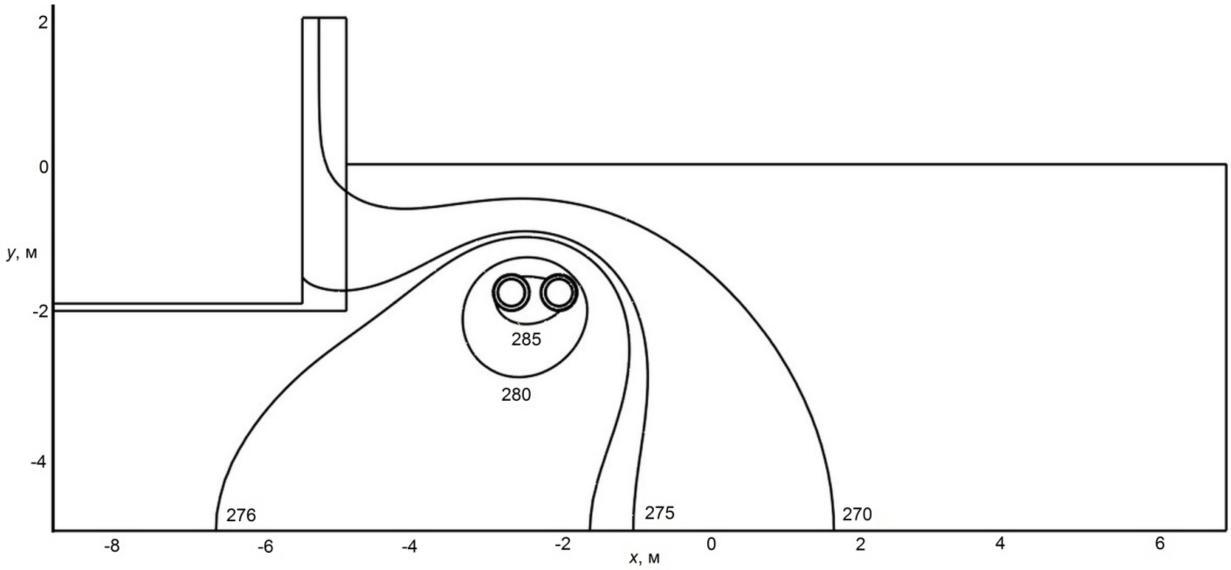


Рисунок 3.Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода при наличии близрасположенных инженерных сооружений (*B* = 2 м, T_{in} = 275,15 К)

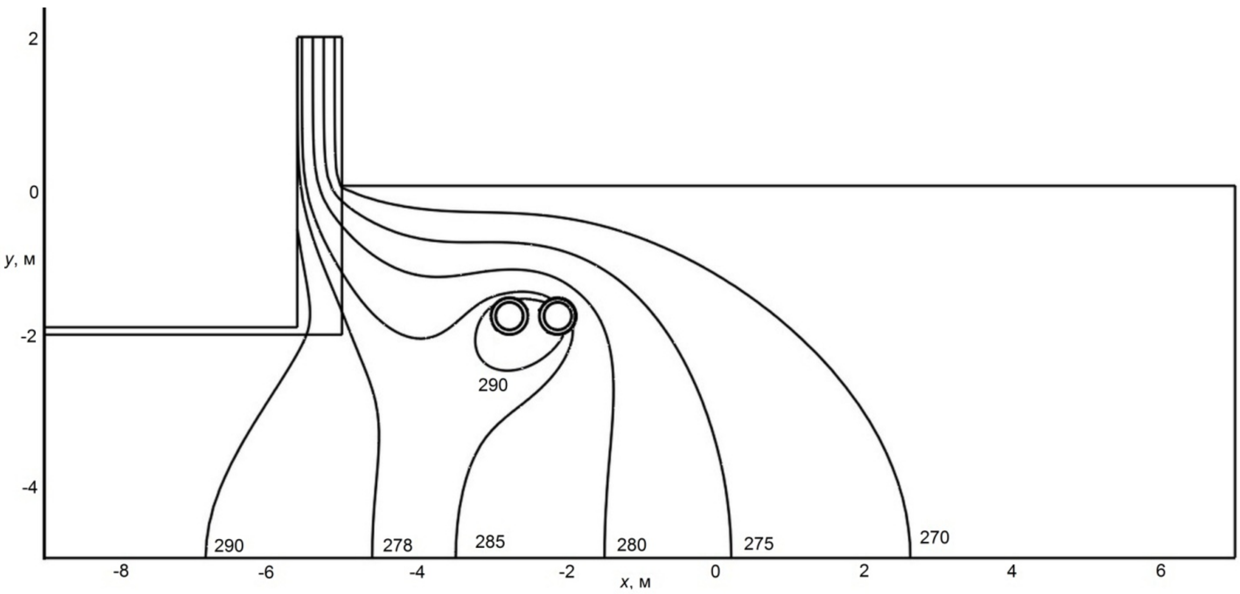


Рисунок 4. Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода при наличии близрасположенных инженерных сооружений (*B* = 2 м, T_{in} = 293,15 К)

Распределения температур в рассматриваемых областях решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рис. 2–4) сгущаются непосредственно над трубопроводами, а также вблизи инженерного сооружения и более разрежены при удалении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности и хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований [21, 22] и теоретическими работами других авторов [35, 36]. При этом необходимо отметить, что в работах [35, 36] приведено недостаточно сведений для детализированного количественного сопоставления результатов моделирования с данными исследований.

Следует еще раз отметить, что результаты проведенных исследований тепловых потерь бесканальных теплопроводов (таблица 2) позволяют сделать вывод о том, что методика [20, 31] является недостаточно корректной и дает завышенные значения тепловых потерь. По этой причине можно рекомендовать ужесточение норм тепловых потерь для бесканальных теплопроводов.

В заключение необходимо сказать о том, что только повсеместное внедрение энергосберегающих мероприятий в различных областях строительства [1–12, 21–23, 35–38] позволит выполнить программу энергосбережения РФ, повысить эффективность производств, эффективно использовать энергию, время, ресурсы и т. д. При этом менее затратным и наиболее быстрым способом анализа перспективности внедрения энергосберегающих мероприятий является использование пакетов прикладных программ, позволяющих учитывать различные эффекты и процессы, приводящие к интенсификации процессов переноса в рассматриваемых системах.

Заключение

Проведен численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов, расположенных в зоне влияния инженерных сооружений.

Установлено, что в рамках предложенной модели тепловые потери теплопровода, находящегося в зоне влияния отапливаемого подвала здания, уменьшаются в диапазоне от 1,53 до 10,79 % в зависимости от температуры внутри инженерного сооружения и расстояния между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания.

Выявлено, что нормативная методика [20, 31] дает существенно завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. Отклонения результатов численного моделирования от данных методики [20, 31] составляют около 33 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения разработанного подхода к анализу тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, находящихся в зоне влияния инженерных сооружений, и о возможности его применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а и грантов Президента РФ № МК-1284.2011.8, МК-1652.2013.8.

Литература

1. Слепченок В.С., Петраков Г.П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 26–32.
2. Слепченок В.С., Петраков Г.П. Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации // Инженерно-строительный журнал. 2009. №7. С. 26–29.
3. Ватин Н.И., Дубов В.В., Петраков Г.П. Внедрение РМД 41-11-2012 Санкт-Петербург «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №1(6). С. 48–54.
4. Королев И.А., Петраков Г.П. Создание испытательного центра для проверки качества пенополиуретановой изоляции предизолированных трубопроводов, применяемых в системах теплоснабжения // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 23–25.

5. Rezaie B., Rosen M.A. District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements // Applied Energy. 2012. Vol. 93. Pp. 2–10.
6. Magnusson D. Swedish district heating – A system in stagnation: Current and future trends in the district heating sector // Energy Policy. 2012. Vol. 48. Pp. 449–459.
7. Hawkey D.J.C. District heating in the UK: A Technological Innovation Systems analysis // Environmental Innovation and Societal Transitions. 2012. Vol. 5. Pp. 19–32.
8. Fahlén E., Ahlgren E. O. Accounting for external costs in a study of a Swedish district-heating system – An assessment of environmental policies // Energy Policy. 2010. Vol. 38. Pp. 4909–4920.
9. Comakli K., Yuksel B., Comakli O. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network // Applied Thermal Engineering. 2004. V.24. No.7. Pp. 1009–1017.
10. Dalla Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low- energy district heating, with focus on heat losses // Energy. 2011. Vol. 36. No.5. Pp. 2407–2418.
11. Kuznetzov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No.4. Pp. 310–315.
12. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20. No.2. Pp. 217–224.
13. Шишкин А. Н. О проекте федерального закона «О теплоснабжении» // Новости теплоснабжения. 2010. №6. С. 20–24.
14. Умеркин Г.Х., Дроздов С.А., Гончаров А.М., Демиденко Н.Н. Определение остаточного ресурса тепловых сетей по статистическим данным об авариях // Новости теплоснабжения. 2007. №11. С. 42–46.
15. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. О нормативной базе промышленной тепловой изоляции // Энергосбережение. 2003. №6. С. 86–89.
16. Байбаков С А., Тимошкин А.С. Основные направления повышения эффективности тепловых сетей // Электрические станции. 2004. №7. С. 19–25.
17. Eriksson D., Sunden B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes // Journal of Building physics. 1998. Vol. 22. No.1. Pp. 110–131.
18. Emmanuel C. Nsofor & Veera Vijay Pipe Insulation Model for Energy Conservation in Buildings // Energy Engineering. 2011. Vol. 108. No.3. Pp. 37–50.
19. Lotz W.A. Pipe insulation specification process // Heating, Piping, Air Conditioning Engineering. 2003. Vol. 75. No.10. Pp. 58–59.
20. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. СПб.: Деан, 2004. 61 с.
21. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 19–24.
22. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс // Известия РАН. Энергетика. 2012. №2. С. 151–159.
23. Козлов Ю.В. Тепловая изоляция энергооборудования // Энергетическое строительство за рубежом. 1983. №4. С. 25–30.
24. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / Под ред. А.А. Николаева. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
25. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. No.5-6. Pp. 923–930.
26. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Distinctive features of the gas-phase ignition of a mixture of a kerosene vapor and air by a steel wire heated to high temperatures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2009. Vol. 82. No.6. Pp. 1059–1065.
27. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer at Ignition of Solid Condensed Substance with Relatively Low Calorific Power by a Local Energy Source // Journal of Engineering Thermophysics. 2012. Vol. 21. No.1. Pp. 69–77.
28. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. 89 с.

29. Garcia A.L. Numerical methods for physics. New York: Prentice Hall, 2000. 423 p.

30. Reddy J.N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. New York: Oxford University Press, 2004. 480 p.

31. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.

32. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.

33. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 46 с.

34. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.

35. Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне подземных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. М.: Издательство МЭИ, 1998. Т. 7. С. 103–105.

36. Иванов В. В., Шкребко С. В. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. М.: Издательство МЭИ, 1998. Т. 7. С. 106–108.

37. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.

38. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9–13.

Вячеслав Юрьевич Половников, г. Томск, Россия
+7(3822)420833; эл. почта: polov@tpu.ru

Евгений Сергеевич Глазырин, 634050, г. Томск, Россия
+7(3822)420833; эл. почта: evgen2103@sibmail.com

Определение толщины теплоизоляции и заглубления подземного трубопровода теплоснабжения в многолетнемерзлых грунтах

К.т.н., старший преподаватель М.П. Акимов;
д.т.н., заведующий кафедрой С.Д. Мордовской,
ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»
д.т.н., заведующий лабораторией Н.П. Старостин,
Институт проблем нефти и газа СО РАН

Аннотация. Исследуется процесс оттаивания – промерзания грунта в основании подземного трубопровода теплоснабжения из полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, эксплуатируемого в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Динамику температурного поля в системе «многослойная труба – грунт» предлагается определять путем численного решения уравнения теплопроводности в полярных координатах. Соответствующая двумерная задача Стефана решена методом конечных разностей сведением к цепочке одномерных задач. Предлагается определять величину заглубления и толщину теплоизоляции трубопровода из условия ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя к началу отопительного сезона. Приводятся результаты расчетов динамики изотерм при воздействии на многолетнемерзлый грунт подземного трубопровода теплоснабжения, показывающие возможность такого восстановления толщины деятельного слоя.

В расчетах имитировались грунтовые условия и температура окружающей среды Якутска, тем не менее, полученные результаты могут быть использованы для условий других регионов распространения многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: бесканальный теплопровод; многолетнемерзлые грунты; температура; задача Стефана; глубина оттаивания; величина заглубления; толщина теплоизоляции

Введение

В практику строительства тепловых сетей широко внедряются трубопроводы с пенополиуретановой изоляцией в полиэтиленовой оболочке типа «труба в трубе». Преимущества такого способа укладки труб из полимерных материалов в заводской теплоизоляции очевидны: они не подвержены коррозии, теплоизоляция не разрушается вследствие увлажнения грунтовыми водами, что позволяет использовать их как бесканальные подземные. Гибкость таких труб позволяет поставлять их на объекты длинномерными отрезками необходимой длины, проходить повороты трассы без применения фасонных деталей. Кроме того, такие трубы не требуют компенсаторов. Благодаря малому весу труб монтажные работы осуществляются без применения грузоподъемной техники. Из опыта эксплуатации в Европе известно, что срок службы полимерных труб составляет не менее 30 лет [1].

Использование таких перспективных трубопроводов в регионах с многолетнемерзлыми грунтами крайне ограничено. Согласно нормативным документам, выбор мероприятий по сохранению устойчивости тепловых сетей должен выполняться на основе расчетов зоны оттаивания мерзлого грунта около трубопроводов [2]. В то же время проблема прогнозирования теплового состояния многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземных теплопроводов до сих пор не решена в полной мере и недостаточно освещена в научной литературе.

Размер зоны оттаивания многолетнемерзлого грунта под воздействием подземного бесканального теплопровода зависит от его заглубления и толщины слоя используемой теплоизоляции. Определение толщины теплоизоляции осуществляется по нормированной плотности теплового потока [3]. Методика определения толщины пенополиуретановой (ППУ) изоляции из условия минимума целевой функции, характеризующей стоимость капитальных затрат и стоимость теплоты в процессе эксплуатации при заданной глубине заложения, приводится в работе [4]. При этом в используемой математической модели теплового процесса взаимодействия теплопровода с ППУ-изоляцией с грунтами не учитываются многие факторы, влияющие на состояние многолетнемерзлого грунта: дневная поверхность, температура окружающего воздуха, теплота фазового перехода влаги и т. д.

При подземной прокладке трубопроводов за расчетную температуру окружающей среды при расчетах рекомендуется брать среднюю за год температуру грунта на глубине заложения оси трубопровода. В районах отсутствия многолетнемерзлых грунтов величина заглубления теплопроводов может задаваться произвольно, поскольку она не нормирована, кроме мест подземного пересечения теплопровода с инженерными сетями и сооружениями. В районах распространения многолетнемерзлых грунтов определение величины заглубления подземных теплопроводов затруднено даже в случае наличия расчетных данных о зоне оттаивания мерзлых грунтов. Причиной тому является отсутствие условий, по которым величина заглубления может быть рассчитана. Таким образом, при строительстве подземных теплопроводов в многолетнемерзлых грунтах неопределенными величинами остаются как заглубление, так и толщина теплоизоляции.

В данной работе на основе математического моделирования оттаивания – промерзания многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземного бесканального трубопровода теплоснабжения с теплоизоляцией предлагается определять толщину теплоизоляции и величину заглубления в районах многолетнемерзлых грунтов сплошного распространения по условию ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Подробное изложение данного материала приводится в работе [5].

Постановка задачи

В большинстве работ, посвященных исследованию температурного поля вокруг подземного трубопровода, рассматриваются задачи определения толщины теплоизоляции с целью уменьшения тепловых потерь [6–11]. Для решения технических проблем перекачки нефти в районах холодного климата часто решаются задачи теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами [12–15]. Решение стационарной двумерной задачи теплообмена теплоизолированных труб с постоянной температурой теплоносителя и мерзлого грунта приводится в работах [16–17]. Поскольку температуры теплоносителя и окружающего воздуха в течение отопительного сезона меняются существенно, для теплопроводов наиболее характерным является нестационарный режим работы. Кроме того, практически неизученным остается поведение границы оттаивания под воздействием многолетнемерзлого грунта вне отопительного сезона. В большинстве работ по исследованию влияния подземного полимерного трубопровода теплоснабжения в процессе эксплуатации на многолетнемерзлый грунт, например в работе [18], температурная задача решается методом конечных разностей в декартовой системе координат.

При таком подходе возникают сложности с аппроксимацией границ рассматриваемой области. В плоском случае границы расчетной области представляют собой отрезки прямых и полуокружностей, что затрудняет выбор системы координат для построения расчетной сетки. При использовании декартовой системы координат приходится аппроксимировать окружности ломаными линиями, что, естественно, влияет на точность определения температурного поля в многослойной трубе ввиду наличия условий теплового контакта между трубой и теплоизоляцией. При исследовании влияния теплоносителя в трубе на тепловое состояние грунта, приближенное задание границ в непосредственной близости от теплообменной поверхности может привести к существенным погрешностям при определении границ оттаивания. Для более точного описания температурного поля в окрестности трубы с теплоносителем перспективным представляется решать задачу в полярных координатах. Естественно, при этом будут приближенно описаны прямые участки границ области, что также снизит точность расчета, но можно предположить, что их влияние на определение границ оттаивания грунта будет значительно ниже.

Примем допущение, что температурный режим теплоносителя в трубопроводе вдоль осевой координаты меняется слабо, а величина заглубления теплопровода практически не меняется по трассе, что позволяет пренебречь тепловыми потоками вдоль теплопровода. Используем фронтовую модель процесса промерзания – оттаивания грунта в виде классической задачи Стефана, учитывающую теплоту фазового перехода на границе мерзлого и талого грунта. Тогда тепловой процесс в системе «труба – грунт» описывается двумерным уравнением теплопроводности в полярных координатах (рис. 1) [19–21].

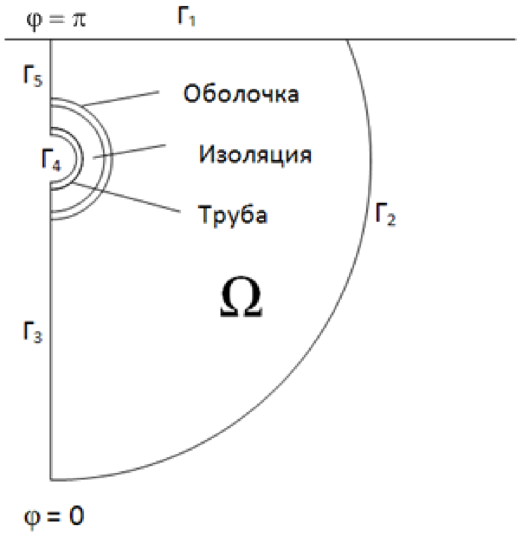


Рисунок 1. Расчетная область грунта вокруг теплопровода

Математическая постановка задачи Стефана со сглаженными коэффициентами формулируется следующим образом. Требуется определить нестационарное температурное поле $T(r,\varphi,t)$, удовлетворяющее уравнению теплопроводности в полярных координатах:

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial\varphi}\right),\ \ (r,\varphi)\in\Omega; \tag{1}$$

граничному условию на дневной поверхности грунта:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\cos\varphi-\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial\varphi}\sin\varphi\right)\bigg|_{\Gamma_1}=-\alpha\left(T(r,\varphi,t)-T_{окр}(t)\right); \tag{2}$$

граничным условиям на границах $Г_2$, $Г_3$ и $Г_5$:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\sin\varphi+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial\varphi}\cos\varphi\right)\bigg|_{\Gamma_2}=0; \tag{3}$$

$$\frac{\partial T}{\partial\varphi}\bigg|_{\Gamma_3}=0,\ \ \frac{\partial T}{\partial\varphi}\bigg|_{\Gamma_5}=0; \tag{4}$$

граничному условию на внутренней поверхности теплопровода:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{\Gamma_4}=\alpha\left(T(r,\varphi,t)-T_{воды}\right) \tag{5}$$

и начальному условию:

$$T(r,\varphi,0)=T_H(r,\varphi). \tag{6}$$

На границах слоев заданы условия идеального теплового контакта:

$$\begin{cases}\lambda_i(T)\dfrac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_i-0}=\lambda_i(T)\dfrac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=r_i+0}\\ T(r_{i-0},\varphi,t)=T(r_{i+0},\varphi,t)\end{cases}\qquad i=1,\ 2,\ 3. \tag{7}$$

Здесь $c\rho(T)$, $\lambda(T)$ – эффективные (сглаженные) коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности, учитывающие теплоту фазового перехода и влажность грунта [22, 23]; α – коэффициент теплообмена свободных поверхностей; r, φ – полярные координаты; t – время.

Нестационарное температурное поле в грунте с теплоизолированной трубой определялось решением системы (1)–(7) методом конечных разностей [24–25]. В рамках метода конечных разностей для подобных задач типа Стефана предложено много методов построения различных разностных схем, которые можно условно разделить на два класса – методы с явным выделением неизвестной границы и разностные методы сквозного счета. К первым с выделением фронта фазового перехода относятся методы ловли фронта в узел сетки [26], методы выпрямления фронтов [27], методы с дробными шагами фронта [28], а к методам сквозного счета – методы, основанные на введении в функции теплосодержания [24, 26]. Более полный обзор по решению задач типа Стефана разностными методами можно найти в работах [29–31]. В данном исследовании используется построенный методом сквозного счета алгоритм решения задачи, подробно изложенный в работе [32].

Определение толщины теплоизоляции и заглубления

В водяных подземных тепловых сетях, как правило, подающий и обратный трубопроводы прокладываются в одном ряду, в котором также располагают трубопроводы для горячего и холодного водоснабжения. В этом случае при расчетах пучок труб можно рассматривать как одну трубу с эквивалентным радиусом [33]. При расчетах рассматривался трубопровод с эквивалентным радиусом 81,5 мм.

Значения теплофизических характеристик материалов, принятые в расчетах, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики грунта и материалов теплопровода

	Труба из сшитого полиэтилена	**Изоляция из пенополиуретана**	**Оболочка из полиэтилена**	**Талый грунт**	**Мерзлый грунт**
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	0,35	0,05	0,42	1,4	1,5
Плотность, кг/м^3	938	33	960	1700	1700
Удельная теплоемкость, Дж/(кг*К)	2300	1800	1700	1850	1750

Температура теплоносителя вне отопительного периода $T_{воды}$ = 10 °C, в отопительный период она составляет от 80 до 95 °C в зависимости от температуры наружного воздуха; коэффициент теплообмена на внутренней поверхности трубы в отопительный период α = 20 Вт/(м$^2\cdot$ °C), вне отопительного сезона α = 10 Вт/(м$^2\cdot$ °C); коэффициент теплообмена на дневной поверхности летом α = 8,7 Вт/(м$^2\cdot$ °C), зимой α = 4 Вт/(м$^2\cdot$ °C); влажность грунта 17,65 %, температура и теплота фазового перехода 0 °C и 333,3 кДж/кг соответственно.

Расчет начинался с апреля месяца. За начальное распределение температуры в грунте принимается однородное распределение со значением –3 °C. Полученное распределение температуры в системе «труба – грунт» в начале третьего отопительного сезона берется за начальное распределение температуры, с учетом того, что за этот период влияние заданного приближенного начального условия становится минимальным. Согласно нормативным документам, среднесуточная температура окружающего воздуха для начала отопительного сезона не превышает 8 °C. Изменение температуры окружающего воздуха во времени описывалось функцией среднесуточных температур:

$$T(t) = 30{,}1\cos\left(\frac{2\pi t}{365} + 10\right) - 8{,}2\,. \tag{8}$$

Заглубление тепловых сетей до верха оболочки при бесканальной прокладке принимается не менее 70 см [2]. При исследовании влияния величины заглубления на оттаивание и промерзание грунта в основании подземного трубопровода теплоснабжения заглубление до верха оболочки трубы изменялось от 70 до 130 см с шагом 20 см. Для каждого значения заглубления толщина теплоизоляции изменялась от 2 до 5 см. Расчеты показывают, что максимальная глубина оттаивания достигается в январе.

На рисунке 2 представлены значения максимальных глубин оттаивания (в январе) грунта при различных заглублениях труб теплоснабжения с различными толщинами теплоизоляции. Как и ожидалось, увеличение заглубления и уменьшение толщины теплоизоляции приводит к увеличению глубины оттаивания.

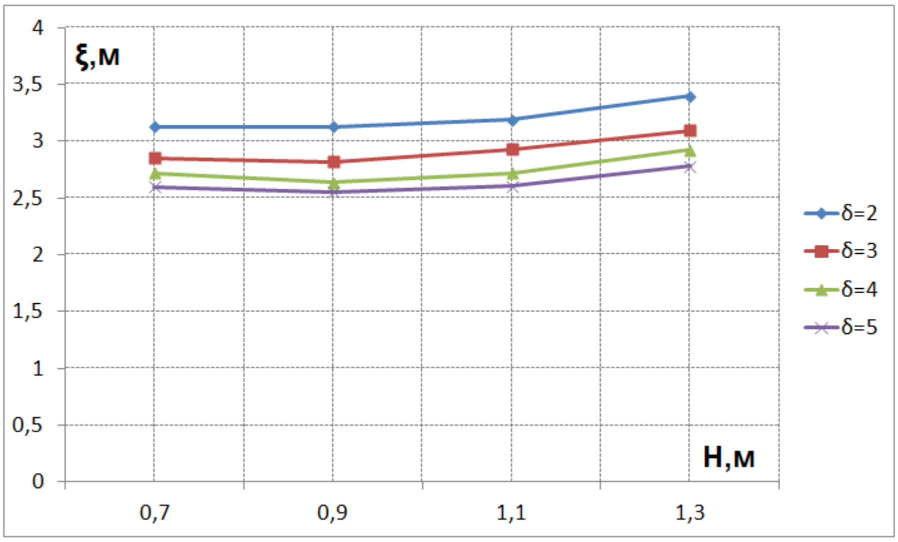


Рисунок 2. Значения максимальных глубин оттаивания ξ при различных заглублениях труб *H* с толщинами теплоизоляции δ

Расчеты показывают, что при всех рассматриваемых толщинах теплоизоляции и величинах заглубления опасности замерзания теплоносителя не существует, поскольку нулевая изотерма проходит по теплоизоляции. Поэтому величина необходимого заглубления не может быть определена по условию предотвращения замораживания теплоносителя. В связи с этим предлагается определять необходимое заглубление подземного бестраншейного теплопровода из условия сохранения толщины деятельного слоя. Величина заглубления должна обеспечивать такую величину максимальной глубины оттаивания, что до начала следующего отопительного сезона (в сентябре) глубина оттаивания восстановится до толщины деятельного слоя. При таком заглублении глубина оттаивания в окрестности трубопровода останется стабильной на протяжении многих лет.

В результате большого количества численных экспериментов с варьированием толщины теплоизоляции было установлено, что толщина теплоизоляции 3 см является минимальной, обеспечивающей восстановление к началу отопительного сезона глубины оттаивания около трубы на уровне деятельного слоя. Об этом свидетельствуют характерные изотермы температур на рисунках 3–6. Из графиков видно, что при толщине теплоизоляции 2 см и заглублении от 70 до 130 см глубина оттаивания не успевает восстановиться до толщины деятельного слоя. При заглублении теплопровода на 70 см и толщине изоляции 3 см глубина оттаивания к началу отопительного сезона восстанавливается до глубины деятельного слоя (рис. 3Б). Поэтому для рассматриваемого теплопровода с толщиной теплоизоляции 3 см рекомендуется величина заглубления, равная 70 см. Для теплопровода с толщиной теплоизоляции 4 см рекомендуется заглубление до 90 см (рис. 4В), с толщиной теплоизоляции 5 см – заглубление до 110 см (рис. 5Г). При заглублении 130 см толщина теплоизоляции должна быть более 5 см (рис. 6).

Область допустимых величин заглублений в зависимости от толщины слоя теплоизоляции представлена на рисунке 7.

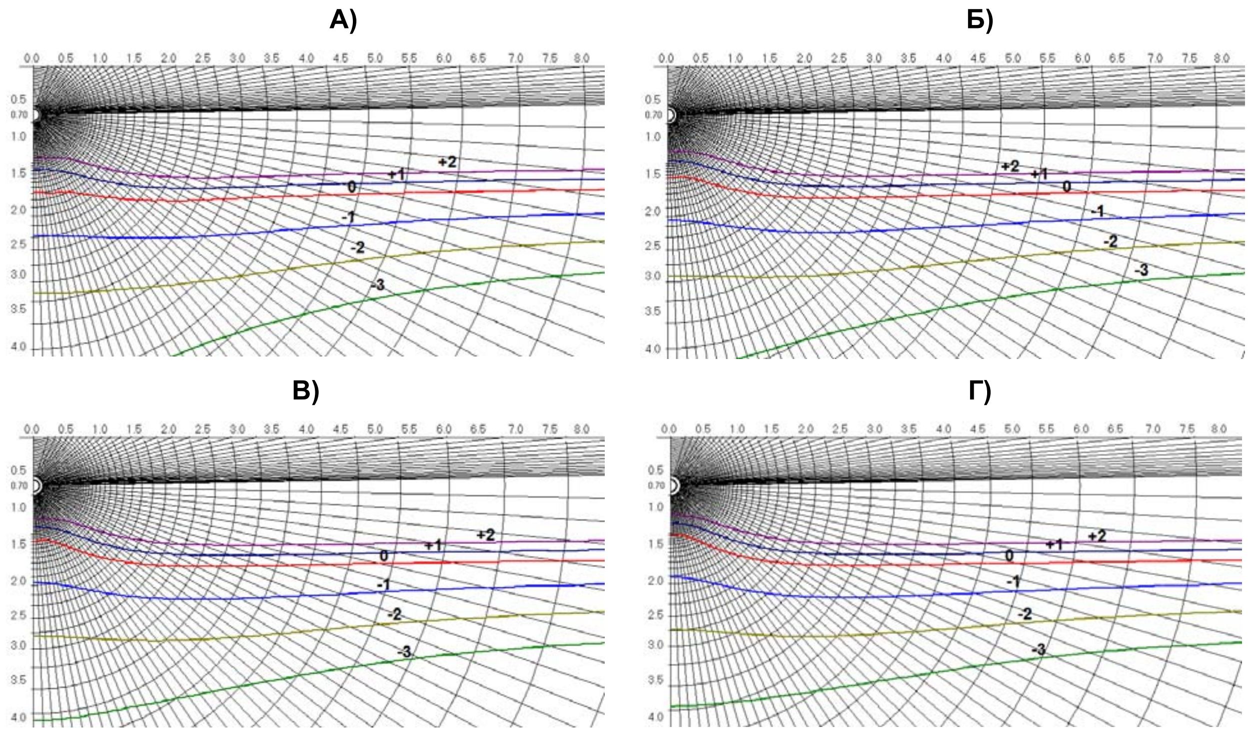


Рисунок 3. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении *H* = 70 см при различных толщинах теплоизоляции δ: А – δ = 2; Б – δ = 3; В – δ = 4; Г – δ = 5 см

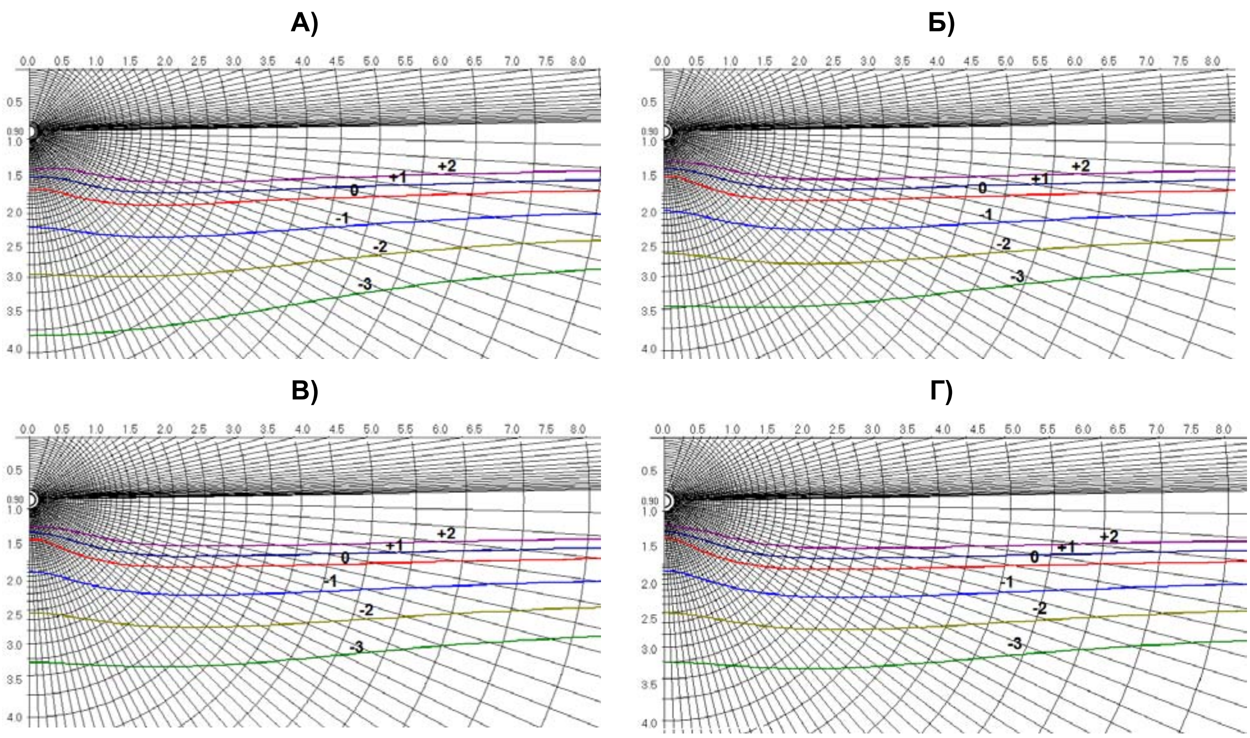


Рисунок 4. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении *H* = 90 см при различных толщинах теплоизоляции δ: А – δ = 2; Б – δ = 3; В – δ = 4; Г – δ = 5 см

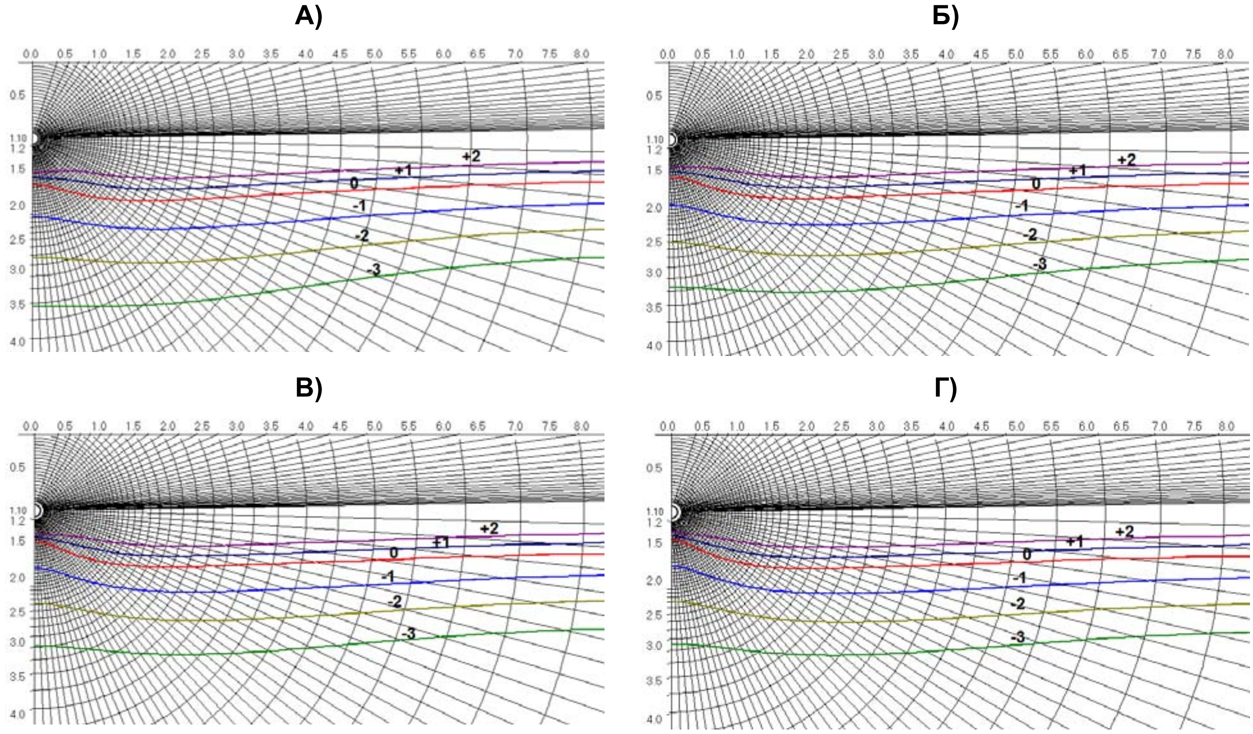


Рисунок 5. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении *H* = 110 см при различных толщинах теплоизоляции δ: А – δ = 2; Б – δ = 3; В – δ = 4; Г – δ = 5 см

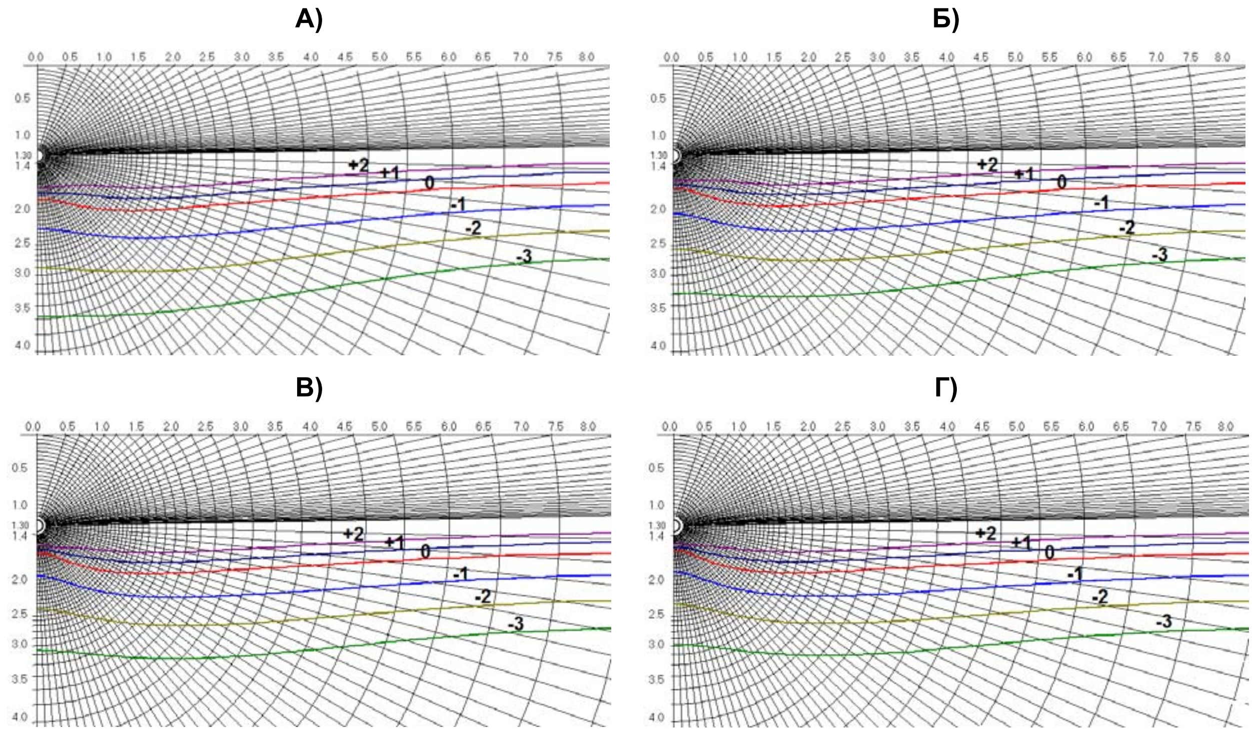


Рисунок 5. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении H = 110 см при различных толщинах теплоизоляции δ: А – δ = 2; Б – δ = 3; В – δ = 4; Г – δ = 5 см

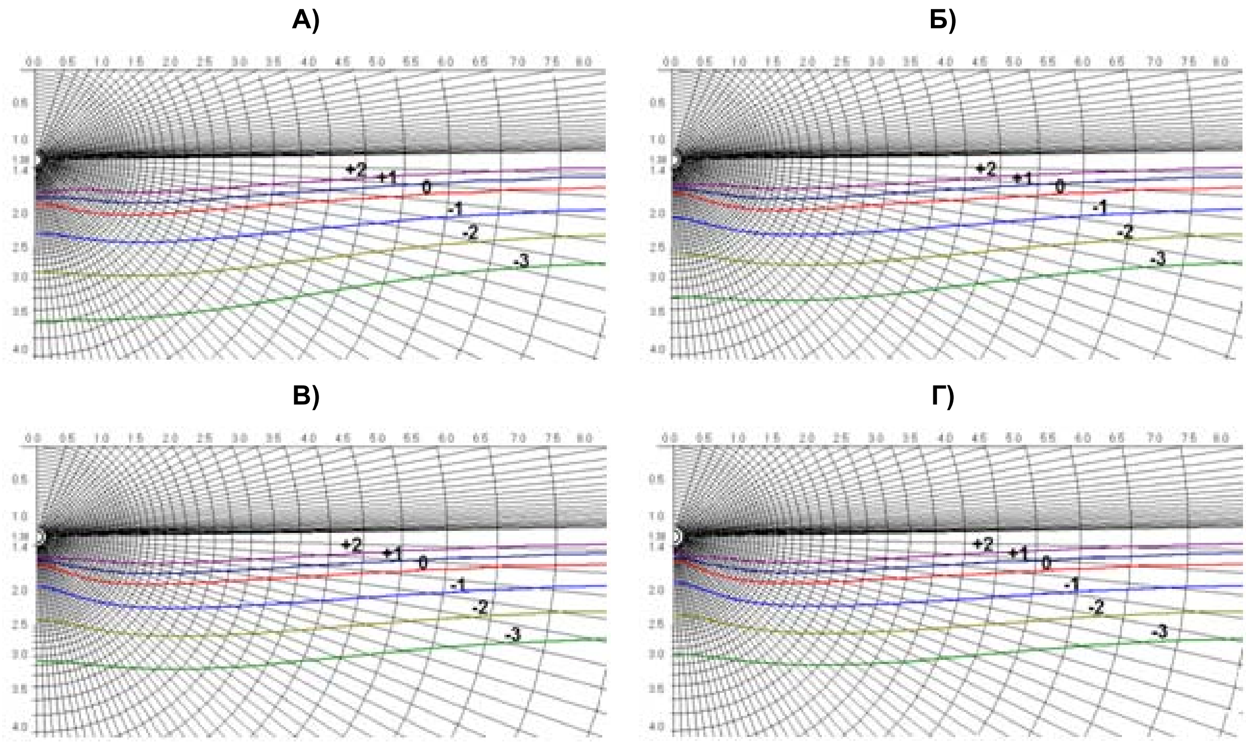


Рисунок 6. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении *H* = 130 см при различных толщинах теплоизоляции δ: А – δ = 2; Б – δ = 3; В – δ = 4; Г – δ = 5 см

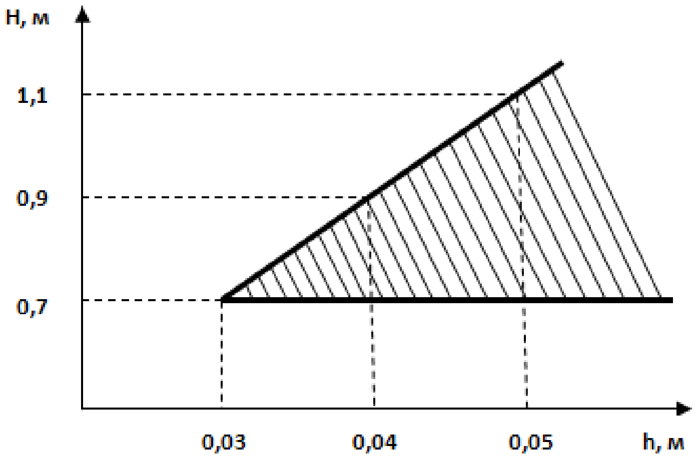


Рисунок 7. Область допустимых величин заглублений в зависимости от толщин теплоизоляции

Предлагаемая методика определения величины заглубления подземного бестраншейного трубопровода теплоснабжения с заданной толщиной теплоизоляции сводится к выполнению следующей цепочки расчетов:

1) задается начальное приближение заглубления *H;*
2) по расчетным изотермам определяется восстанавливаемость границы оттаивания в начале отопительного сезона до границы деятельного слоя вычислением значения функционала

$$J(H)=\int_0^l \left[Г_{оттаив}(x)-Г_{деят}(x)\right]^2 dx\,, \qquad (9)$$

где $Г_{оттаив}$, $Г_{деят}$ – функции границ оттаивания и деятельного слоя соответственно;

3) методом одномерной минимизации определяется следующее приближение величины заглубления к решению задачи минимума функционала (2.7), характеризующего восстановление до начала отопительного сезона глубины оттаивания многолетнемерзлого грунта на уровне деятельного слоя;
4) расчеты повторяются с пункта 2 до определения точки экстремума с заданной точностью.

Расчеты динамики температурного поля вокруг подземного теплопровода проводились для климатических условий Якутска. Тем не менее, предлагаемая методика определения толщины теплоизоляции и величины заглубления трубопровода теплоснабжения из условия восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя к началу отопительного сезона может быть рекомендована и для других регионов распространения многолетнемерзлых грунтов.

Заключение

1. Тепловой процесс в системе «многослойная труба – грунт» предлагается описывать уравнением теплопроводности в полярных координатах.

2. Расчетами промерзания и оттаивания многолетнемерзлых грунтов установлена возможность определения толщины теплоизоляции и величины заглубления по условию ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона.

Литература

1. Концепция РАО «ЕЭС России» технической и организационно-экономической политики в области теплофикации и централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2002. №1. С. 1–11.
2. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. М., 2004.
3. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М., 2004.
4. Налобин Н.В. Оптимизация толщины пенополиуретановой изоляции теплопроводов в системах теплоснабжения объектов на севере Западной Сибири: Дис…канд. наук. Тюмень, 2007. 138 с.
5. Акимов М.П. Моделирование и численный анализ динамики температурного поля многолетнемерзлых грунтов при воздействии бесканальных подземных трубопроводов теплоснабжения: Дис…канд. наук. Якутск, 2013. 110 с.
6. Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses // Energy. 2011. Vol. 36. No.5. Pp. 2407–2418.
7. Keçebaş A, Alkan M, Bayhan M. Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31. No.17. Pp. 3929–3937.
8. Li H, Svendsen S. Energy and exergy analysis of low temperature district heating network // Energy. 2012. Vol. 45. No.1. Pp. 237–246.
9. Perpar M., Rek Z., Bajric S., Zun I. Soil thermal conductivity prediction for district heating pre-insulated pipeline in operation // Energy. 2012. Vol. 44. No.1. Pp. 197–210.
10. Gao P., Zhou G. Study on temperature field around heat pipe underground based on line heat source theory // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No.9. Pp. 2483–2487.
11. Корягин А.Н. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе мониторинга тепловых потерь и оптимизации параметров тепловой изоляции: Дис…канд. наук. Иваново, 2011. 155 с.
12. Xu G., Qi J., Jin H. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 64. No.3. Pp. 262–270.
13. Zhang C., Wang H., Sun Q., Sun D. Temperature Field and Heat Transfer Analysis of Underground Buried Pipe // ICMTMA '11 Proceedings of the 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2011. Vol. 3. Pp. 636–639.
14. Pang L., Wang J. Study on Numerical Simulation for Soil Temperature Field Underground Heated Pipe // System Simulation Academic journal. 2004. Vol. 16. No.3. Pp. 485–491.
15. Gu F., Ma G., Sun N. and Li X. A Numerical Calculation on Soil Moisture and Heat Couple Temperature Field around Pipelines in the Process of Alternate Transportation of Cool-Hot Crude Oil // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology (ICPTT). 2009. Pp. 362–372.

16. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 16–24.

17. Kuznetzov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No.4. Pp. 310–315.

18. Размазин Г.А., Моисеев Б.В. Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки теплопроводов с вечномерзлыми грунтами // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов. Сб. материалов I Международной научно-практической конференции. Пенза, ПДЗ, 2000. С. 106–110.

19. Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Воздействие подземного трубопровода теплоснабжения на многолетнемерзлые грунты Крайнего Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2012. Т. 9. №2. С. 19–23.

20. Акимов М.П. Моделирование теплового воздействия подземного трубопровода с теплоносителем на вечномерзлые грунты // Нефтегазовое дело. 2013. Т.11. №2. С. 73–77.

21. Акимов М.П., Старостин Н.П., Мордовской С.Д. Математическое моделирование теплового процесса в вечномерзлом грунте при воздействии полимерного трубопровода теплоснабжения // Материалы XVII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС’2011), Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. С. 28–30.

22. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. №5. С. 816–827.

23. Слепцов В.И., Мордовской С.Д., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 104 с.

24. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

25. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 439 с.

26. Будак Б.М., Соловьев Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1964. Т. 5. №5. С. 828–840.

27. Волков С.А. Численные решения двухфазной задачи Стефана // Вычислительные методы и программирование. М.: ВЦ МГУ, 1967. Вып. 6. С.217–230.

28. Охлопков Н.М. Численные методы решения краевых задач математической физики. Якутск: Издательство ЯГУ, 1993. 177 с.

29. Васильев В.И. Численное интегрирование дифференциальных уравнений с нелокальными граничными условиями. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. 160 с.

30. Изаксон В.Ю., Петров Е.Е. Численные методы прогнозирования и регулирования теплового режима горных пород области многолетней мерзлоты: Препринт // ИГДС СО РАН. Якутск: Издательство ЯФ СО АН СССР, 1986. 96 с.

31. Тихонов.А.Н., Самарский А.А., Уравнения математической физики. М: Наука,1966. 501 с.

32. Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Численный алгоритм для исследования влияния бесканального подземного трубопровода теплоснабжения на вечномерзлые грунты // Математические заметки ЯГУ. 2010. Т. 17. № 2. С. 125–131.

33. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

Мир Петрович Акимов, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)
+7(924)861-90-60; эл. почта: mir_akimov@mail.ru

Сергей Денисович Мордовской, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)
+7(924)662-16-18; эл. почта: msd@mail.ru

Николай Павлович Старостин, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)
+7(914)221-44-95; эл. почта: nikstar56@mail.ru

Сравнительный теплотехнический расчет систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды)

Д.т.н., профессор А.К. Соловьев;
аспирант О.А. Туснина,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Аннотация. Полые трубчатые световоды являются весьма эффективными системами. Применение световодов может снизить затраты на искусственное освещение здания и повысить комфортность труда людей в помещении.

В данной статье проведен сравнительный теплотехнический расчет покрытий с двумя типами систем естественного освещения. Исследовались покрытия с применением полых трубчатых световодов как наиболее современное решение и как наиболее традиционное и широко распространенное решение – зенитных фонарей. Расчет выполнялся численным методом в двух вычислительных комплексах – NASTRAN и TEPL, что повышает достоверность результатов.

В результате расчета определено, что применение световодов позволяет улучшить теплозащитные свойства покрытия и повысить приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции. Таким образом, выявлено еще одно преимущество применения световодов.

Ключевые слова: приведенное сопротивление теплопередаче; теплотехнический расчет; полый трубчатый световод; зенитный фонарь

Одним из перспективных способов повышения эффективности естественного освещения зданий является применение полых трубчатых световодов [1]. Полый трубчатый световод – это устройство, проводящее свет внутрь здания. Световоды принимают естественный свет на крыше здания и передают его в помещение. Обладая рядом преимуществ, световоды являются перспективной и удобной системой естественного освещения здания.

Применение световодов позволяет экономить энергию, затрачиваемую на отопление, вентиляцию и охлаждение помещения. Основным преимуществом является уменьшение затрат энергии на искусственное электрическое освещение помещений, оборудованных световодами. Кроме того, проведение естественного освещения в помещения, не имеющие к нему доступа, повышает комфортность пребывания там людей, улучшает условия работы и повышает производительность труда и качество результата.

В данной статье исследуются теплотехнические качества покрытия с установленными в нем световодами. Проводится сравнение теплозащитных свойств покрытия с системой естественного освещения из световодов с покрытием с традиционным решением естественного освещения – зенитными фонарями.

Обзор литературы

Многие ученые, как отечественные, так и зарубежные, занимались исследованием полых трубчатых световодов [2–7], разработкой новых конструктивных систем и оценкой их экономической эффективности.

В статьях [8, 9, 10, 11] проведена оценка экономической эффективности применения систем полых трубчатых световодов для освещения зданий и удобства их применения с точки зрения комфортности пребывания человека в помещениях.

В статье [8] проведен анализ стоимости и преимуществ систем полых трубчатых световодов в помещениях, не имеющих доступа к естественному освещению, в сравнении с использованием электрического освещения. Работа показала, что на первый взгляд световоды не являются достаточно эффективной системой в сравнении с обычным искусственным освещением. Однако если учесть неочевидные выгоды, такие как улучшение условий труда человека в помещениях с естественным освещением и, как следствие, повышение производительности и качества работы, то можно сказать, что применение световодов является экономически целесообразными. Стоит отметить, что в данной работе не произведена оценка теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий с учетом наличия в них световодов.

В статье [11] анализ применения систем полых трубчатых световодов показал, что их использование позволяет значительно снизить расход электроэнергии на освещение здания. Также сделан вывод, что наиболее эффективно применять световоды в сочетании с автоматически регулируемым искусственным освещением.

Системы полых трубчатых световодов активно применяются в различных странах Европы (Германия, Великобритания, Италия) [12, 13, 14]. На территории нашей страны эти системы еще не получили широкого распространения, однако работа в этом направлении ведется, и световоды постепенно внедряются в практику проектирования.

На рынке представлено большое разнообразие систем полых трубчатых световодов [15–19], таких, например, как SOLARSPOT [20], Heliobus [21] и др.

Проведенный обзор существующих исследований показал, что полые трубчатые световоды являются весьма перспективными и обладают рядом преимуществ, позволяя обеспечить экономический эффект и комфортность пребывания и труда человека в помещении. Однако эффективность применения полых трубчатых световодов в отношении теплотехники на данный момент недостаточно изучена, в связи с этим целью настоящей работы является исследование теплозащитных свойств покрытий со световодами и сопоставление с другими широко известными системами естественного освещения.

Постановка задачи

В данной статье приведены результаты теплотехнического расчета двух типов систем верхнего естественного освещения в здании. Рассматривались зенитные фонари как наиболее распространенная система, используемая в покрытиях зданий, и полые трубчатые световоды как одна из перспективных систем, повышающая эффективность естественного освещения здания.

Исследовались системы со следующими характеристиками.

Зенитный фонарь. Выделена часть покрытия здания размерами в плане 5х5 м, в пределах которой расположен один зенитный фонарь размерами в плане 2.9х2.9 м (рис. 1). Принята ограждающая конструкция послойной сборки, состоящая из двух стальных листов (λ = 58 Вт/(м·°С)) толщиной 1 мм и слоя утеплителя из минеральной ваты (λ = 0.05 Вт/(м·°С)) толщиной 200 мм. Остекление фонаря принято двуслойное: стекла (λ = 1.15 Вт/(м·°С)) толщиной 3 и 4 мм – внутреннее и наружное соответственно. Замкнутая воздушная прослойка между стеклами толщиной 23 мм имеет теплопроводность λ = 0.15 Вт/(м·°С).

Полый трубчатый световод. Выделена часть покрытия здания размерами в плане 1х1 м, в пределах которой расположен один световод диаметром 375 мм (рис. 2). Состав кровли принят такой же, как в случае зенитного фонаря. Светопроводящий канал световода толщиной 2 мм выполнен из алюминия (λ = 230 Вт/(м·°С)). Наружный прозрачный купол выполнен из органического стекла (λ = 0.2 Вт/(м·°С)) толщиной 2 мм. Внутреннее распределяющее свет стекло (λ = 1.15 (Вт/(м·°С)) имеет толщину 4 мм. Принято, что стенки световода утеплены минеральной ватой (λ = 0.05 Вт/(м·°С)) толщиной 50 мм. Замкнутая воздушная полость внутри светопроводящего алюминиевого канала имеет теплопроводность λ = 9.33 Вт/(м·°С).

В обеих задачах принято, что температура наружного воздуха равна –30 °С, внутреннего воздуха +18 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхностях, граничащих с наружным воздухом, равен 8.7 Вт/(м·°С), на поверхностях, граничащих с внутренним воздухом, – 23 Вт/(м·°С).

Расчет производился в программных комплексах TEPL (рис. 3, 5) и NASTRAN (рис. 4, 6) для подтверждения достоверности получаемых результатов. По итогам расчета в комплексе TEPL получено трехмерное распределение температур в конструкции, на основании которого автоматическим образом вычислена величина приведенного сопротивления теплопередаче конструкции. В результате расчета в комплексе NASTRAN получено только трехмерное поле температур в конструкции.

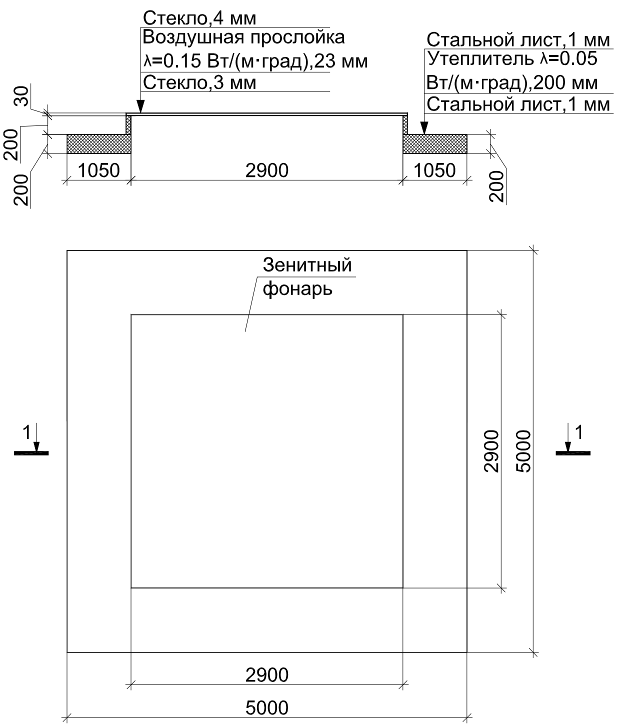


Рисунок 1. Исследуемая система естественного освещения с использованием зенитного фонаря

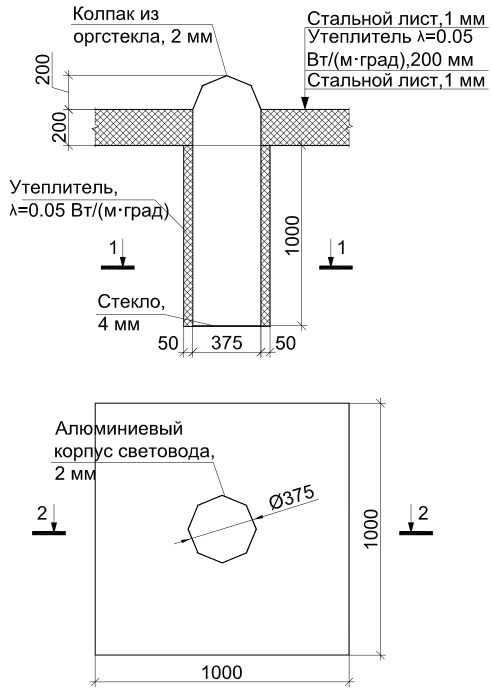


Рисунок 2. Исследуемая система естественного освещения с использованием полого трубчатого световода

Рисунок 3. Расчетная схема покрытия с зенитным фонарем в программном комплексе TEPL (см. сечение 1-1, рис. 1) Разными цветами показаны области с разным коэффициентом теплопроводности

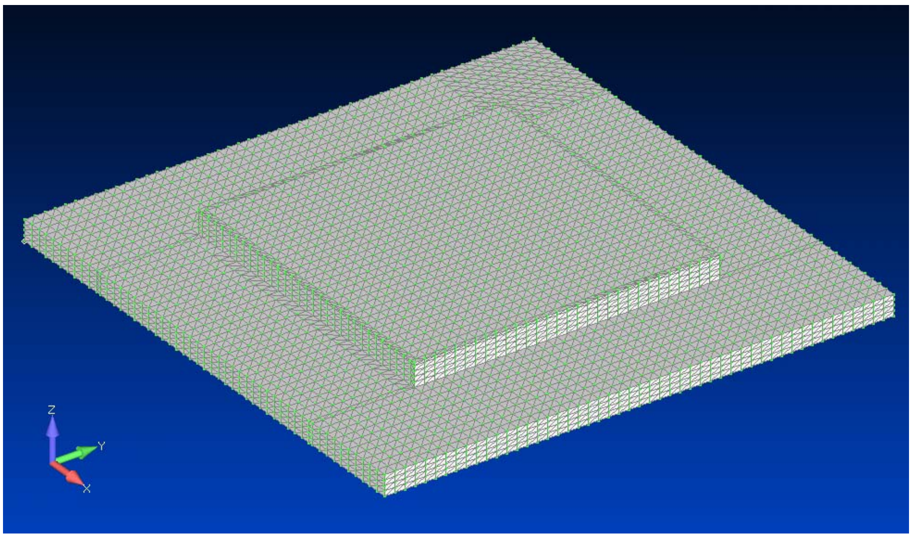


Рисунок 4. Расчетная схема для расчета покрытия с зенитным фонарем в программном комплексе NASTRAN

а) б)

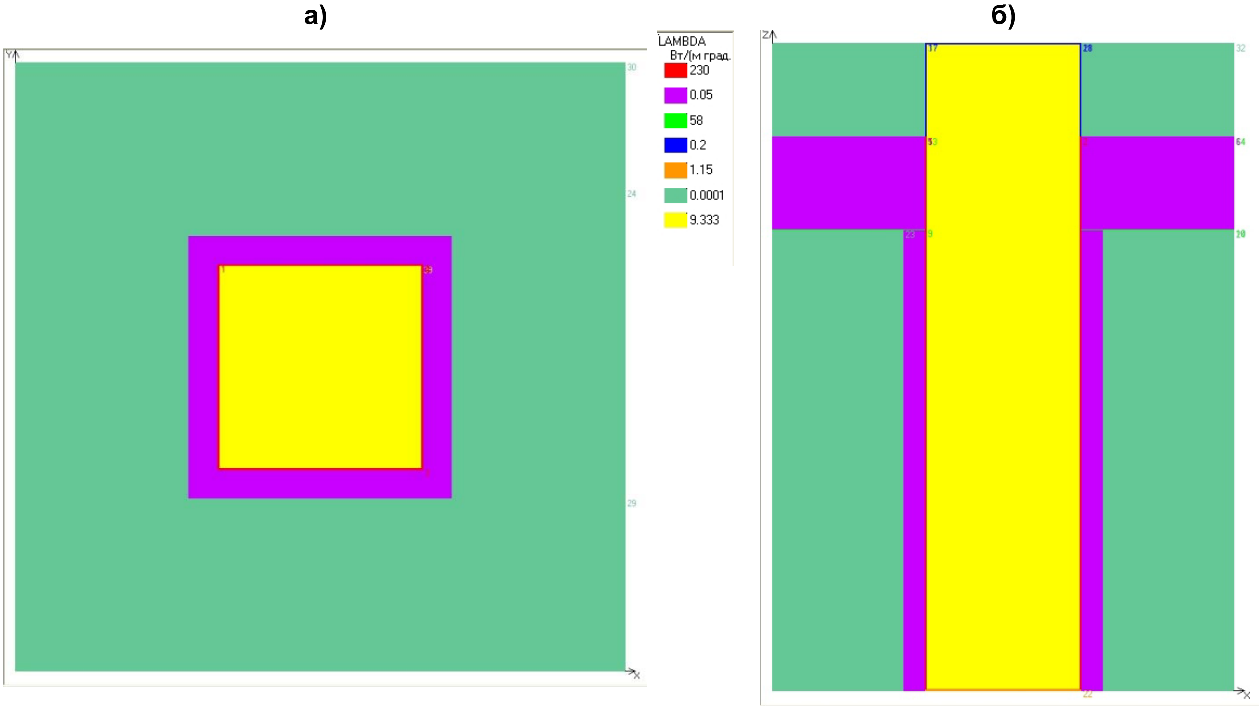


Рисунок 5. Расчетная схема покрытия со световодом в программном комплексе TEPL (а – см. сечение 1-1, рис. 2; б – см. сечение 2-2, рис. 2)

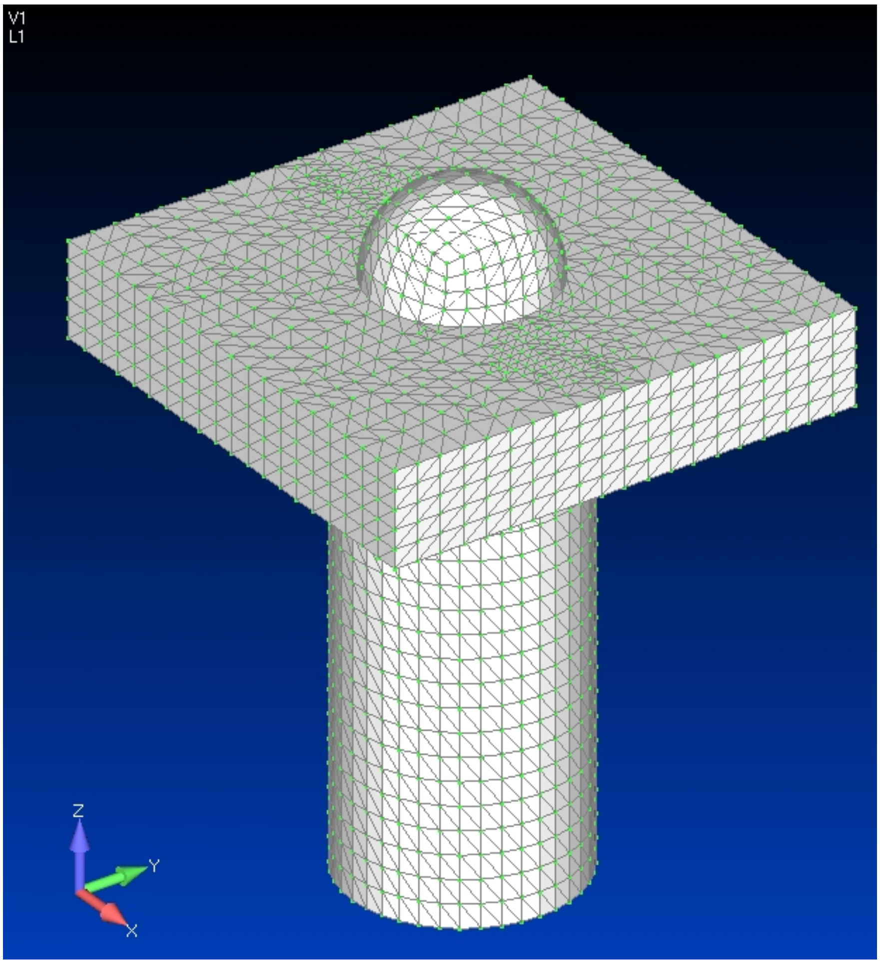


Рисунок 6. Расчетная схема покрытия со световодом в программном комплексе NASTRAN

Результаты исследования

По результатам расчета получили следующие картины распределения температур в конструкции (рис. 7–10).

а)

б)

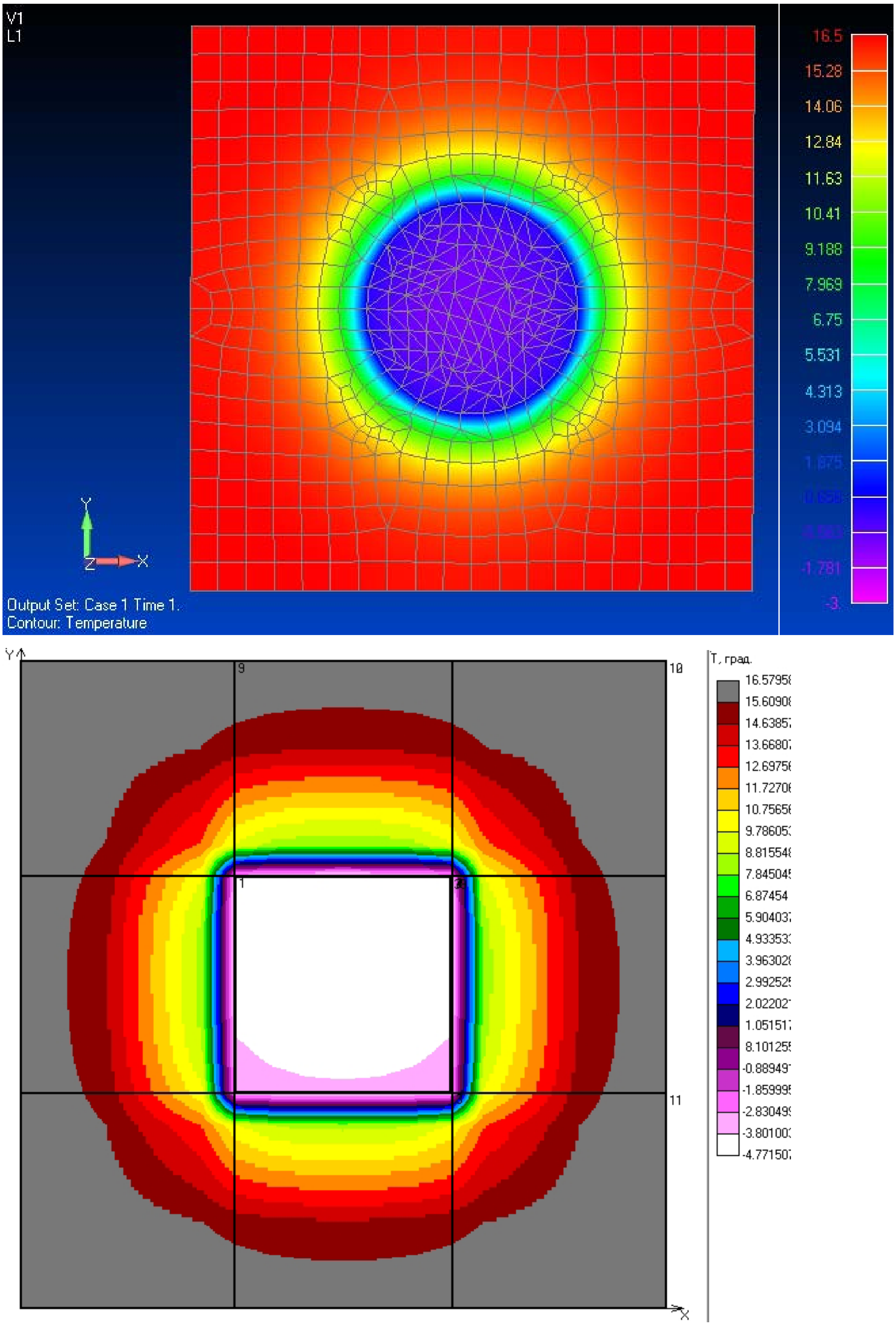


Рисунок 7. Распределение температур по нижнему стальному листу для световода (а – NASTRAN; б – TEPL)

а) б)

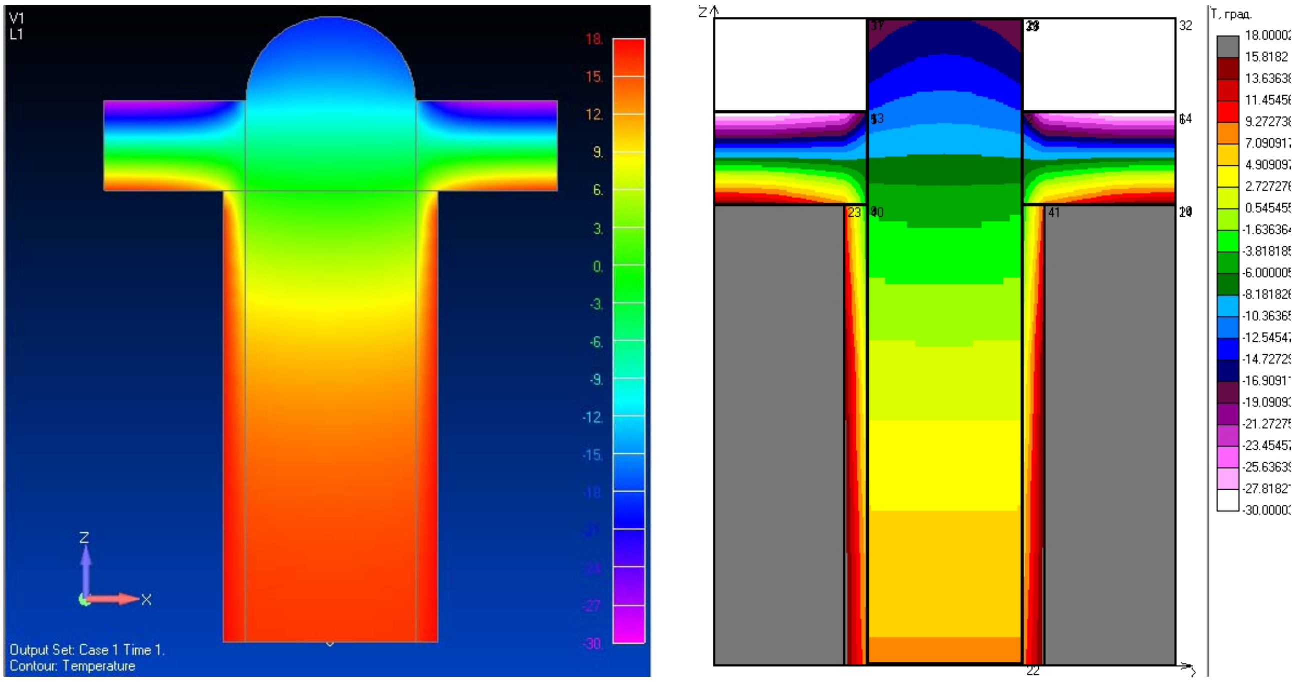


Рисунок 8. Распределение температур по сечению световода (а – NASTRAN; б – TEPL)

а) б)

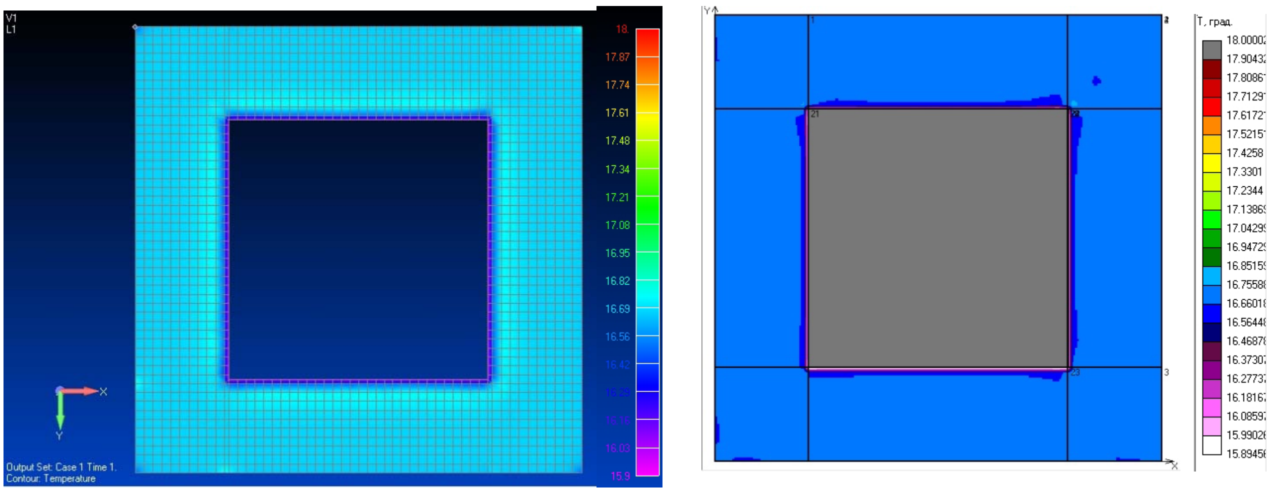
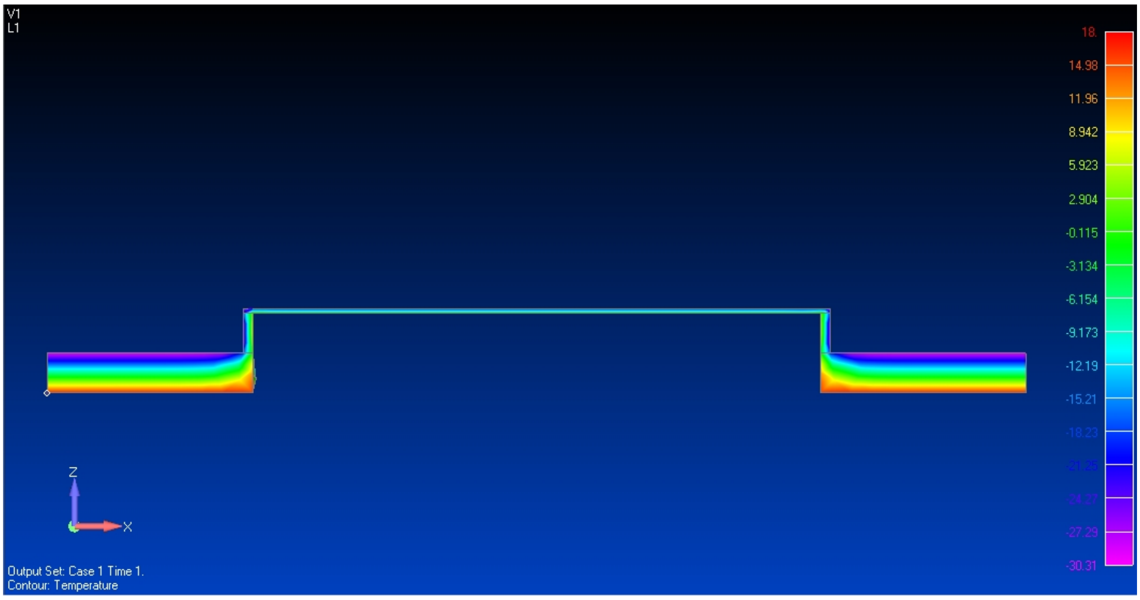


Рисунок 9. Распределение температур по нижнему стальному листу для зенитного фонаря (а – NASTRAN; б – TEPL)

а)



б)

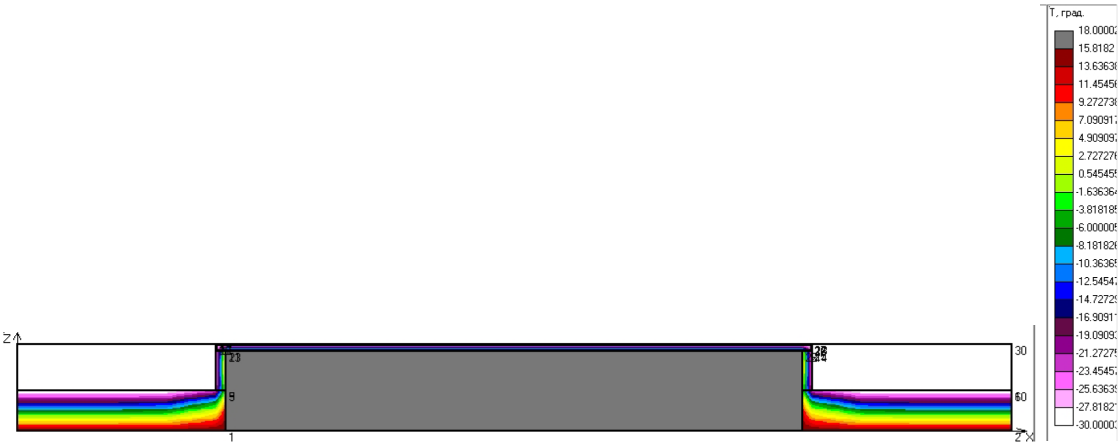


Рисунок 10. Распределение температур по сечению зенитного фонаря (а – NASTRAN; б – TEPL)

Как видно из представленных рисунков, результаты расчета температурного поля конструкции, полученные в комплексах NASTRAN и TEPL, весьма схожи, что говорит об их достоверности.

В вычислительном комплексе TEPL мы получили следующие значения приведенных сопротивлений теплопередаче (табл. 1). Расчет температурного поля проводился при различных точностях, что представлено в таблице, с целью определения достаточной для достоверности результатов точности.

Таблица 1. Полученные величины приведенного сопротивления теплопередаче

Точность расчета	Приведенное сопротивление теплопередаче *R*, $м^2·°C$ /Вт	
	Световод	Зенитный фонарь
0.1	10.559	0.788
0.01	2.247	0.732
0.001	0.964	0.729
0.0001	0.904	0.728
0.00001	0.898	0.728
K	3.630846325	117.805632

Зависимость величины приведенного сопротивления теплопередаче от точности расчета температурного поля представлена на графиках (рис. 11). Как видно, с увеличением точности расчета результаты стремятся к определенному пределу, который можно принять за достаточно достоверный результат.

а) б)

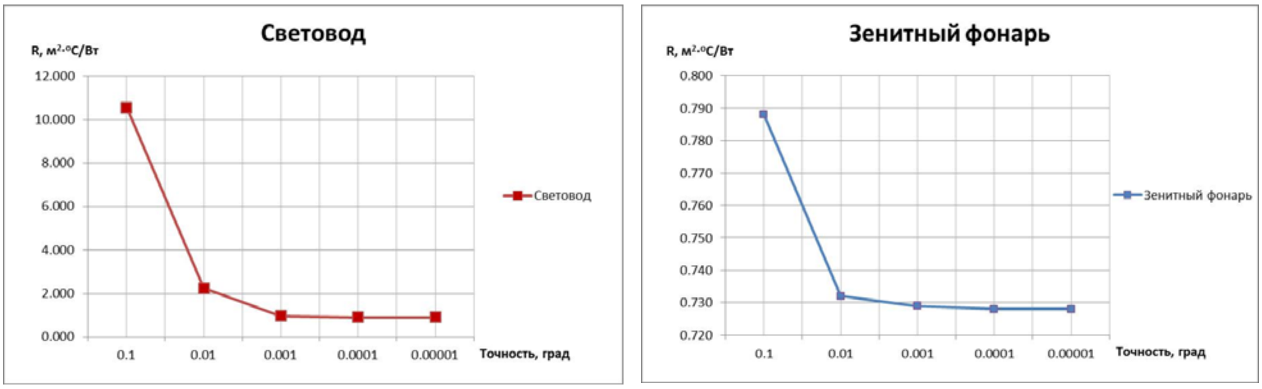


Рисунок 11. Графики зависимости сопротивления теплопередаче от точности расчета температурного поля (а – для покрытия со световодом; б – для покрытия с зенитным фонарем)

На основании данных, представленных в табличном и графическом видах, можно сделать вывод, что результаты, получаемые при точности расчета температурного поля 0.00001, являются достаточно достоверными. Кроме того, сравнение температурных полей, полученных по результатам расчета в TEPL и NASTRAN, показало хорошее совпадение, что подтверждает достоверность результатов.

Так как расчет проводился для условной части покрытия размером 1 x 1 и 5 x 5 м для световода диаметром 375 мм и зенитного фонаря размерами 2.9 x 2.9 м соответственно, необходимы формулы для пересчета сопротивления теплопередаче целого покрытия с учетом наличия в нем *n* световодов или зенитных фонарей различного размера.

Сопротивление теплопередаче равно $R = \dfrac{\Delta t \cdot A}{Q}$,

где Δt – перепад температур, °С;
A – площадь, м^2;
Q – поток теплоты, Вт.
Поток теплоты равен $Q = q \cdot A$,
где q – плотность потока теплоты, Вт/м^2;
А – площадь, м^2.

Теплопотери происходят на всех поверхностях конструкции, граничащих с воздухом. Однако при расчете сопротивления теплопередаче суммарные теплопотери следует относить только к площади горизонтальной поверхности. Таким образом, при расчете суммарного теплового потока Q через конструкцию учитываются тепловые потоки через все поверхности, а при расчете сопротивления теплопередаче учитываются только поверхности (и, соответственно, площади), оказывающие сопротивление теплопередаче.

При выводе формул приведем все к площади покрытия и световодов или зенитных фонарей в нем.

Примем, что сопротивление теплопередаче однородной конструкции данного покрытия площадью A_1 равно R_1:

$$R_1 = \frac{\Delta t \cdot A_1}{q_1 A_1} = \frac{\Delta t}{q_1}.$$

Плотность потока теплоты через эту часть покрытия постоянна и равна q_1.

Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции покрытия площадью A_1 с наличием в ней одного световода или зенитного фонаря площадью A_2 равно:

$$R_2 = \frac{\Delta t \cdot A_1}{q_1(A_1 - A_2) + q_2 A_2}.$$

Представим отношение сопротивлений теплопередаче однородной конструкции к неоднородной коэффициентом k:

$$k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta t A_1 \cdot (q_1(A_1 - A_2) + q_2 A_2)}{q_1 A_1 \cdot \Delta t A_1} = \frac{q_1(A_1 - A_2) + q_2 A_2}{q_1 A_1} = \frac{A_1 - A_2 + \frac{q_2}{q_1} A_2}{A_1},$$

где q_2 – плотность потока теплоты через световод или зенитный фонарь.

Отсюда получаем, что $\frac{q_2}{q_1} = \frac{A_1(k-1) + A_2}{A_2}$.

Так как плотность потока теплоты через неоднородность конкретного типа (световод или зенитный фонарь) – величина постоянная, можно определить отношение q_2/q_1 для зенитного фонаря и для световода исходя из результатов выполненного численного расчета этих систем.

В данном случае имеем следующее.

Световод. Диаметр 375 мм (площадь $A_2 = 0.11045$ м^2), размеры исследуемой части покрытия 1 х 1 м (площадь $A_1 = 1$ м^2). Сопротивление теплопередаче однородной конструкции определяется по стандартной формуле, как для послойной конструкции (состав см. на рис. 1, 2):

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_в} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_н} = \frac{1}{8.7} + \frac{0.001}{58} + \frac{0.2}{0.05} + \frac{0.001}{58} + \frac{1}{23} = 4.15846 м^2 °C / Вт.$$

Отношение равно $k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{4.15846}{0.898} = 4.6308$.

Отношение плотностей тепловых потоков для покрытия со световодом равно:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{A_1(k-1) + A_2}{A_2} = \frac{1 \cdot (4.6308 - 1) + 0.11045}{0.11045} = 33.874.$$

Зенитный фонарь. Размер 2.9х2.9 м (площадь $A_2 = 8.41$ м^2), размеры исследуемой части покрытия (площадь $A_1 = 25$ м^2). Сопротивление теплопередаче однородной конструкции такое же, как у системы со световодом: $R_1 = 4.15846 м^2 °C / Вт$.

Отношение равно $k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{4.15846}{0.728} = 5.712$.

Отношение плотностей тепловых потоков для покрытия с зенитным фонарем равно:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{A_1(k-1) + A_2}{A_2} = \frac{25 \cdot (5.712 - 1) + 8.41}{8.41} = 15.007.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче покрытия с учетом наличия в нем n световодов/зенитных фонарей площадью $A_{св}$ равно:

$$R = \frac{\Delta t A_o}{q_1(A_o - nA_{св}) + q_2 n A_{св}} = \frac{\Delta t}{q_1} \cdot \frac{A_o}{A_o - nA_{св} + \frac{q_2}{q_1} n A_{св}} = \frac{R_o A_o}{A_o + nA_{св}(\frac{q_2}{q_1} - 1)},$$

где R_o – сопротивление теплопередаче однородного покрытия;
A_o – площадь покрытия.

Обозначим $K_o = \frac{q_2}{q_1} - 1$.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче определяется по формуле:

$$R = \frac{R_o A_o}{A_o + nA_{св}K_o}, \quad (1)$$

где R_o – сопротивление теплопередаче однородного покрытия, м^2·°С /Вт;
A_o – площадь покрытия, м^2;
n – количество световодов/зенитных фонарей;
$A_{св}$ – площадь одного световода/зенитного фонаря, м^2;
K_o – коэффициент, равный
для световода K_o = 32.874;
для зенитного фонаря: K_o = 14.

Ниже представлены графики зависимости приведенного сопротивления теплопередаче рассматриваемых частей покрытия (1x1 м и 5x5 м) со световодом (рис. 12) и с зенитным фонарем (рис. 13) соотвественно от площади световода/зенитного фонаря.

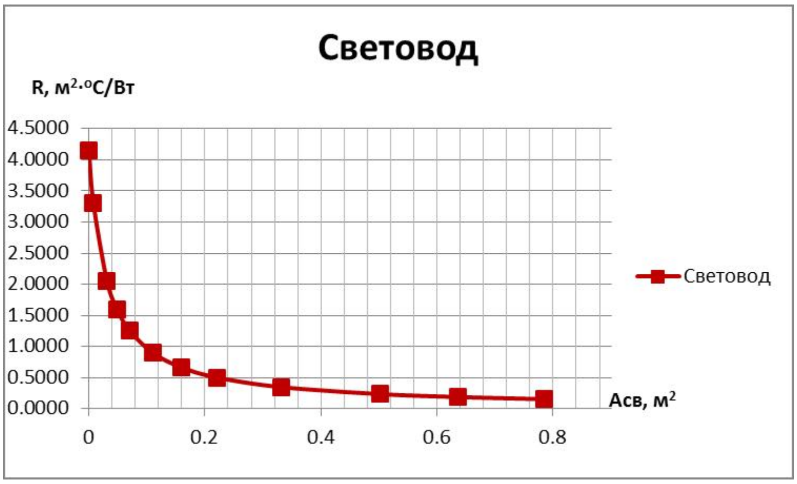


Рисунок 13. График зависимости приведенного сопротивления теплопередаче от площади световода, устраиваемого в покрытии размерами 1x1 м

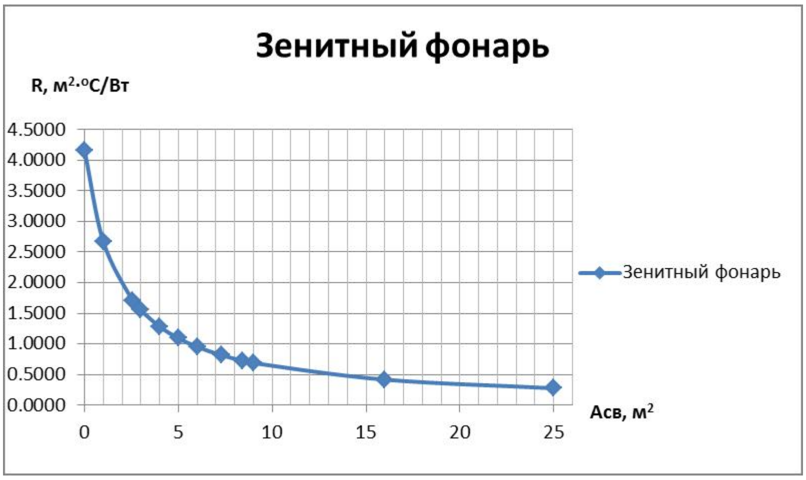


Рисунок 14. График зависимости приведенного сопротивления теплопередаче от площади зенитного фонаря, устраиваемого в покрытии размерами 5x5 м

Также результаты расчета по формуле (1) приведенного сопротивления теплопередаче в зависимости от площади проема представлены в табличном виде (табл. 2).

Графики описывают гиперболу: при площади проема, равной 0, получаем сопротивление теплопередаче однородной конструкции; при площади проема, стремящейся к площади исследуемой части покрытия, график асимптотически стремится к определенному пределу, равному сопротивлению теплопередаче световода/зенитного фонаря. Такой характер графиков совпадает с общеизвестными зависимостями подобного рода, из чего можно сделать вывод, что предложенная формула пересчета приведенного сопротивления теплопередаче для произвольного покрытия верна.

Таблица 2. Приведенное сопротивление теплопередаче в зависимости от площади проема

Световод			Зенитный фонарь		
***d*, м**	***A*, м^2**	***R*, м^2·°С /Вт**	**Размер *axb*, м**	***A*, м^2**	***R*, м^2·°С /Вт**
0	0	4.1585	0	0	4.1585
0.1	0.007854	3.3051	1x1	1	2.6652
0.2	0.031416	2.0457	1.5x1.7	2.55	1.7122
0.25	0.049087	1.5910	1.5x2	3	1.5511
0.3	0.070686	1.2511	2x2	4	1.2830
0.375	0.110447	0.8980	2x2.5	5	1.0939
0.45	0.159043	0.6677	2x3	6	0.9534
0.53	0.220618	0.5039	2.7x2.7	7.29	0.8178
0.65	0.331831	0.3492	2.9x2.9	8.41	0.7280
0.8	0.502655	0.2373	3x3	9	0.6882
0.9	0.636173	0.1898	4x4	16	0.4173
1	0.785398	0.1551	5x5	25	0.2771

Сравнение результатов

Проведем сравнение теплозащитных свойств двух покрытий с системами естественного освещения из световодов и из зенитных фонарей, дающих одинаковую освещенность.

Один зенитный фонарь размерами 2.9x2.9 м на площади 5x5 м по СП 23-102-2003 [22] дает коэффициент естественного освещения (КЕО), равный 1.0 %. Для создания КЕО = 1% необходимо [1] применить 12 световодов диаметром 375 мм на площадь 5x5 м.

Таким образом, имеем следующие величины сопротивлений теплопередаче покрытия с исследуемыми системами верхнего естественного освещения.

Приведенное сопротивление теплопередаче покрытия со световодами по формуле (1) равно:

$$R_{св} = \frac{R_o A_o}{A_o + nA_{св}K_o} = \frac{4.159 \cdot 25}{25 + 12 \cdot 0.11045 \cdot 32.874} = 1.517 м^2 °C / Вт .$$

Приведенное сопротивление теплопередаче покрытия с зенитными фонарями равно:

$$R_{ф} = \frac{R_o A_o}{A_o + nA_{св}K_o} = \frac{4.159 \cdot 25}{25 + 1 \cdot 8.41 \cdot 14} = 0.728 м^2 °C / Вт .$$

Таблица 3. Сравнение приведенных сопротивлений теплопередаче покрытий со световодами и с зенитными фонарями

	Световод	**Зенитный фонарь**	**Разница, %**
R, м^2·°С /Вт	1.517	0.728	52%

Получаем, что приведенное сопротивление теплопередаче покрытия со световодами, равное $R_{св} = 1.571 м^2 °C / Вт$, больше приведенного сопротивления теплопередаче покрытия с зенитными фонарями ($R_{ф} = 0.728 м^2 °C / Вт$) на 52 %.

Таким образом, применение световодов позволяет снизить теплопотери здания и повысить приведенное сопротивление теплопередаче покрытия на 52 %.

Выводы

Выполненные исследования теплотехнических свойств покрытий со световодами и с зенитными фонарями показали, что применение световодов в качестве системы естественного освещения в покрытиях зданий позволяет повысить сопротивление теплопередаче на 52 % и улучшить теплозащитные свойства покрытия.

Таким образом, применение систем полых трубчатых световодов не только эффективно в отношении экономии затрат на освещение помещения, но и обеспечивает лучшие теплозащитные свойства ограждения здания и снижает расходы на отопление.

Литература

1. Соловьев А.К. Физика среды. М.: АСВ, 2008. 341 с.
2. Chao B.I. Solartube performance and pay back analysis. International report STI. July, 29. 1996.
3. Muhs J. Design and analysis of hybrid solar lighting and full-spectrum solar energy systems // Proceedings of the American Solar Energy Society Solar 2000 Conference. Paper number 33. 2000. Pp. 1–9.
4. Jenkins D., Muneer T. Modelling light-pipe performances – a natural daylight solution // Building and Environment. 2003. Vol. 38. Pp. 965–972.
5. Rosemann A., Kaase H. Lightpipe application for daylight systems // Solar Energy. 2005. Vol. 78. Pp. 772–780.
6. Shao L., Riffat S.B. Daylight using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation // Lighting Research and Technology. 2000. Vol. 32. Pp. 133–139.
7. Zhang X., Muneer T., Kubie J. A design guide for performance assessment of solar light-pipes // Lighting Research and Technology. 2002. Vol. 34. Pp. 149–169.
8. Mayhoub M.S., Carter D.J. The costs and benefits of using daylights guidance to light office buildings // Buildings and Environment. 2011. Vol. 46. Issue 3. Pp. 698–710.
9. Carter D.J., Marwaee M. User attitudes toward tubular daylight guidance systems // Lighting Research and Technology. 2009. Vol. 41. Issue 1. Pp. 71–88.
10. Дженкинс Д., Мунир Т. Экономия затрат при использовании полых трубчатых световодов в безоконных частях зданий // Светотехника. 2004. №5. С. 34–38.
11. Соловьев А.К. Полые трубчатые световоды. Их применение для естественного освещении и экономии энергии // Светотехника. 2011. №5. С. 41–47.
12. Carter D.J. Tubular guidance systems for daylight: UK case studies // Building research and information. 2008. Vol. 36. Issue 5. Pp. 520–535.
13. Mayhoub M.S., Carter D.J. Hybrid lighting systems: a feasibility study for Europe // Proceedings of the 1st LuxEuropa. 2009. Vol. 1. Istanbul, Turkey. Pp. 265–272.
14. Пейн Т. Развитие полых световодов в Великобритании // Светотехника. 2004. №3. С. 39–45.
15. Carter D.J. Developments in tubular daylight guidance systems // Building research and information. 2004. Vol. 32. Issue 3. Pp. 220–234.
16. Rosemann A., Mossman M., Whitehead L. Development of a cost-effective solar illumination system to bring natural light into the building core // Solar Energy. 2008. Vol. 82. Issue 4. Pp. 302–310.
17. Айзенберг Ю.Б., Бухман Г.Б., Коробко А.А., Пятигорский В.М. Полые протяженные световоды на современном этапе // Светотехника. 2004. №3. С. 14–23.
18. Smith G.B. Materials and systems for efficient lighting and delivery of daylight // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2004. Vol. 84. Pp. 395–409.
19. Whitehead L.A., Nodwell R.A., Curzon F.L. New efficient light guide for interior illumination // Applied Optics. 1982. Vol. 21. Pp. 2755–2757.
20. Бракале Дж. Естественное освещение помещений с помощью новой пассивной системы «SOLARSPOT» // Светотехника. 2005. №5. С. 34–42.
21. Aizenberg J.B. Principal new hollow light guide system "Heliobus" for daylight and artificial lighting of central zones of multi storey buildings // Proceedings of the Right Light 4 conference. 1997. Pp. 239–243.
22. СП 23-102-2003 Естественное освещение жилых и общественных зданий. 2005. 87 с.

Алексей Кириллович Соловьев, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(903)183-86-33; эл. почта: k.solovev@yandex.ru

Ольга Александровна Туснина, Москва, Россия
Тел. моб.: +7(910)476-16-77; эл. почта: lazoltus@mail.ru

Эксергетический анализ систем вентиляции с утилизацией полной теплоты

Аспирант И.О. Суходуб,
д.т.н., профессор, зав. каф. теплотехники и энергосбережения В.И. Дешко,
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Аннотация. Были рассмотрены тепловая, механическая и химическая составляющие эксергии воздуха в помещении, а также ее изменение в зависимости от параметров наружного воздуха (температура, влажность и давление) в течение различных периодов года с использованием климатических данных для Киева (IWEC). При этом в зимнее время преобладает тепловая составляющая, а летом – химическая.

Был проведен анализ различных подходов к определению эксергетической эффективности вентиляционных систем с утилизацией полной теплоты (универсальная, функциональная и максимальная эксергетическая эффективность) на разных границах системы (теплообменник и установка в целом). Были проанализированы зависимости этих показателей эффективности от температуры и влажности наружного воздуха (окружающая среда). Также были рассчитаны средневзвешенные коэффициенты эксергетической эффективности для холодного и теплого времени года для Киева.

Ключевые слова: система вентиляции; энергосбережение; телпоутилизация; эксергетический анализ; теплообменник с паропроницаемой мембраной

Введение

В условиях умеренного и холодного климата улучшение теплоизоляции и герметичности здания наряду с нагрузкой на систему отопления за счет теплопередачи и инфильтрации усиливает интерес к системам вентиляции. Утилизация теплоты в системах вентиляции может существенно снизить потребность здания в энергии. Однако такие системы утилизации используют электрическую энергию для приводов вентиляторов. До тех пор, пока доля электрической энергии по сравнению с долей утилизированной тепловой энергии незначительна, утилизация является выгодной.

Данная статья анализирует эффективность утилизации полной теплоты (явной и скрытой) в системах вентиляции с перекрестноточным мембранным рекуперативным теплообменником в рамках потоков эксергии, т. е. с учетом качества тепловой и электрической энергии. Для рассмотрения была выбрана компактная канальная система вентиляции с горизонтальным расположением.

Эксергия потока влажного воздуха

В работах [1, 2 и др.] удельная эксергия потока вещества в общем виде рассматривается как сумма кинетической, потенциальной, термомеханической и химической эксергии:

$$ex = ex_{\mathrm{k}} + ex_{\mathrm{p}} + ex_{\mathrm{th}} + ex_{\mathrm{me}} + ex_{\mathrm{ch}}, \tag{1}$$

где $ex_{\mathrm{k}} = \dfrac{v^2}{2}$ – кинетическая эксергия потока (v – скорость потока); $ex_{\mathrm{p}} = gZ$ – потенциальная эксергия потока (g – ускорение свободного падения, Z – высота над уровнем моря); ex_{th} – термическая эксергия, связанная с разницей температур; ex_{me} – механическая эксергия, связанная с разницей давлений; ex_{ch} – химическая эксергия, связанная с химическим потенциалом компонентов потока.

В некоторых работах сумму термической и механической эксергии записывают как физическую. При анализе энергетических систем часто не учитывают кинетическую и потенциальную эксергию потока [2], поэтому в формуле (1) можно оставить только три последние составляющие.

Для влажного воздуха составляющие эксергии имеют вид [3]:

$$ex_{\text{th}} = \left(c_{\text{pa}} + \omega c_{\text{pv}}\right)\left(T - T_0 - T_0 \ln\left(T/T_0\right)\right); \quad (2)$$

$$ex_{\text{me}} = \left(1+\omega\right) R_{\text{a}} T_0 \ln\left(p/p_0\right); \quad (3)$$

$$ex_{\text{ch}} = R_{\text{a}} T_0 \left[\left(1+1,608\omega\right)\ln\left(\frac{1+1,608\omega_0}{1+1,608\omega}\right) + 1,608\omega \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right], \quad (4)$$

где T, T_0 – температуры потока воздуха и окружающей среды соответственно, К; ω, ω_0 – влагосодержание потока воздуха и окружающей среды, кг/кг; p, p_0 – давление потока воздуха и окружающей среды, Па; R_a – газовая постоянная для воздуха, кДж/(кг·К); c_{pa}, c_{pv} – соответственно теплоемкости сухого воздуха и водяного пара, кДж/(кг·К). Если просуммировать эти три составляющих (2)–(4) и преобразовать выражение, то получится формула для расчета эксергии влажного воздуха, приведенная в работе [4].

Окружающая среда

Параметры окружающей среды для эксергетических расчетов теплоэнергетических и промышленных установок обычно принято считать постоянными. Очевидно, что окружающая среда и, следовательно, уровень отсчета должны выбираться в соответствии с реальной обстановкой, в которой находится и работает технический объект. Чувствительность результатов эксергетического анализа к выбору параметров окружающей среды может колебаться в широком диапазоне в связи с условиями работы анализируемой энергетической системы. Соответственно, когда состояние системы значительно отличается от выбранной точки отсчета эксергии, эксергетические потоки не очень чувствительны к определению параметров окружающей среды, что справедливо для анализа электростанций и высокотемпературных промышленных установок. В свою очередь, если свойства системы близки к параметрам окружающей среды, результаты эксергетического анализа подвергаются значительным колебаниям в зависимости от выбранной точки отсчета эксергии.

Это как раз и есть случай эксергетического анализа для систем вентиляции, для которого предлагается выбирать параметры окружающей среды, соответствующие температуре, влажности и давлению наружного воздуха, которые постоянно меняются. Такой принцип выбора точки отсчета эксергии позволяет получать более детализированный и комплексный анализ, чем оценка с использованием постоянных параметров точки отсчета эксергии [5, 6]. Однако иногда используют подход с постоянными параметрами окружающей среды. В качестве его параметров могут быть использованы среднесезонные, среднегодовые значения, проектные условия и т. п. В силу значительной чувствительности эксергетического анализа к условиям работы системы вентиляции каждый из этих случаев в значительной степени влияет на полученные результаты. Это существенно затрудняет сравнение результатов различных типов анализа (появляется несоответствие оценок по результатам динамического и постоянного анализа), что подчеркивает потребность в разработке общей методики проведения эксергетического анализа для систем вентиляции.

Кроме того, эксергетический анализ систем использует не только температуру, но и давление, и химический состав окружающей среды. Во многих исследованиях по зданиям [6] принимают во внимание только тепловую часть эксергии воздуха и пренебрегают механической и химической составляющими. В работе [3] анализировались составляющие эксергии воздуха в помещении для холодного и теплого периода года для разных городов Китая. В качестве параметров окружающей среды принимается температура, давление наружного воздуха ($t_0 = t_{oa}$, $p_0 = p_{oa}$) и влагосодержание насыщенного влажного воздуха ω_{0s} при этих условиях (t_{oa}, p_{oa}). При этом результаты расчетов показали: потери эксергии из-за падения давления в теплообменнике обычно меньше, чем потенциал термической и химической эксергии; в среднем, значение эксергии воздуха в помещении больше зимой, чем летом; зимой преобладает термическая эксергия, а летом – химическая.

В работах [7, 8] проводится анализ влияния выбора параметров окружающей среды (температуры, влагосодержания и давления) для расчета эксергии воздуха в здании для климатических данных трех различных городов (умеренный морской, холодный и жаркий влажный климат). Предположение об одинаковости давлений в помещении и снаружи может вносить погрешность в определение эксергии воздуха в помещении в пределах от 10 (для холодного климата) до 35% (для умеренного). При пренебрежении разницей влагосодержаний погрешность в определении эксергии для всего года может составлять от 3,2 (для холодного климата) до 86,5% (для жаркого и влажного). Также авторы пришли к выводам о возможности использовать статические параметры окружающей среды для холодного климата (а именно значение моды наружной температуры), при этом погрешность составляет до 9%. Однако такой подход неприемлем для жаркого влажного и для умеренного морского климата.

Показатели эксергетической эффективности

Эксергетический анализ систем вентиляции аналитическими методами можно проводить по размерным и безразмерным показателям [9, 10]. Как размерный показатель рекомендуется использовать полные затраты эксергии на функционирование системы. В некоторых случаях целесообразно оценивать систему с удельными затратами эксергии, например, на 1 м^2 или 1 м^3 обслуживаемого помещения. В то же время численное значение размерного показателя фиксирует только полученный результат и не дает представления о том, в какой степени оцениваемое решение близко к оптимальному при данных начальных условиях. В.М. Бродянский и др. [10] различают два подхода к определению эксергетического КПД: по отношению получаемого полезного эффекта к затратам и по отношению эксергетических характеристик для идеализированного и реального процессов.

В работе [11] рассматривались потребности в эксергии и ее потери для здания при различных температурах наружного воздуха. При этом рассматривался вариант без теплоутилизации и с тепловым насосом и теплоутилизатором. Во втором варианте отношение термической эксергии к затраченной электрической мощности утраивается при понижении температуры наружного воздуха от +10 до –10 °С. В работах [12, 13] рассматривались потребности в энергии и эксергии для систем вентиляции здания (только вытяжная или сбалансированная с рекуператором) для климатических данных Голландии.

В работе [14] приведен критический анализ универсальной эксергетической эффективности с учетом его потенциала для анализа инженерных систем зданий. Была исследована чувствительность универсальной эксергетической эффективности теплообменника явной теплоты к изменениям температуры окружающей среды, температуры воздуха на входе в теплообменник и тепловой эффективности.

Общая формула для универсальной или простой эксергетической эффективности [15]:

$$\eta_{\mathrm{ex,u}} = \frac{\sum Ex_{\mathrm{out}}}{\sum Ex_{\mathrm{in}}}, \tag{5}$$

где $\sum Ex_{\mathrm{out}}$ – сумма выходных потоков эксергии; $\sum Ex_{\mathrm{in}}$ – сумма входных потоков эксергии.

Общая формула для функциональной, или рациональной, эксергетической эффективности [15]:

$$\eta_{\mathrm{ex,f}} = \frac{\sum Ex_{\mathrm{product}}}{\sum Ex_{\mathrm{source}}}, \tag{6}$$

где $\sum Ex_{\mathrm{product}}$ – эксергия той части выходных энергетических потоков, которые могут считаться продуктом системы; $\sum Ex_{\mathrm{source}}$ – эксергия той части входных энергетических потоков, которые необходимы для производства продукта в данном процессе.

Для теплообменника формула универсальной эксергетической эффективности будет иметь вид [15, 16, 17]:

$$\eta_{\mathrm{ex,u,HRU}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}} + Ex_{\mathrm{ea}}}{Ex_{\mathrm{oa}} + Ex_{\mathrm{ra}}}, \tag{7}$$

где Ex_{sa} – эксергия потока приточного воздуха; Ex_{oa} – эксергия потока наружного воздуха; Ex_{ra} – эксергия потока воздуха из помещения; Ex_{ea} – эксергия потока выбрасываемого воздуха; HRU – теплоутилизатор.

Изменение эксергии приточного воздуха может считаться желаемым продуктом процесса в уравнении (6), в то время как вытяжной воздух обеспечивает эксергию для получения этого продукта. Таким образом, изменение эксергии вытяжного воздуха может считаться источником эксергии. Тогда для теплообменника формула для функциональной эксергетической эффективности будет иметь вид:

$$\eta_{\mathrm{ex,f,HRU}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}} - Ex_{\mathrm{oa}}}{Ex_{\mathrm{ra}} - Ex_{\mathrm{ea}}}. \tag{8}$$

В формуле (7) потери эксергии относятся к сумме входных эксергий ($Ex_{\mathrm{oa}} + Ex_{\mathrm{ra}}$), в то время как в формуле (8) – к изменению эксергии вытяжного воздуха ($Ex_{\mathrm{ra}} - Ex_{\mathrm{ea}}$). Так как ($Ex_{\mathrm{ra}} - Ex_{\mathrm{ea}}$) всегда меньше, чем ($Ex_{\mathrm{oa}} + Ex_{\mathrm{ra}}$), то функциональная эффективность более чувствительна к изменениям эксергетических потерь, чем универсальная.

В работе [18] эксергетичекий КПД теплообменника рассматривается как отношение увеличения работоспособности (эксергии) одного вещества ΔL_+ (ΔEx_+) к снижению работоспособности другого вещества ΔL_- (ΔEx_-):

$$\eta_{\mathrm{ex}} = \frac{\Delta L_+}{\Delta L_-} = \frac{\Delta Ex_+}{\Delta Ex_-}. \tag{9}$$

Для теплообменника явной теплоты в работе [10] предлагается следующая форма записи эксергетического коэффициента эффективности:

$$\eta_{\mathrm{ex,f}} = \frac{\Delta Ex_{\mathrm{th,2}}}{\nabla Ex_{\mathrm{th+me,1}} + \nabla Ex_{\mathrm{me,2}}}, \tag{10}$$

где $\Delta Ex_{\mathrm{th,2}}$ – увеличение термической составляющей эксергии приточного воздуха при давлении на входе в теплообменник, обусловленное нагревом потока; $\nabla Ex_{\mathrm{th+me,1}}$ – уменьшение термомеханической эксергии вытяжного воздуха, обусловленное снижением температуры и давления этого потока; $\nabla Ex_{\mathrm{me,2}}$ – уменьшение механической составляющей эксергии приточного воздуха при температуре входа, обусловленное снижением давления этого потока.

В работе [19] в качестве эксергетического КПД теплообменника принимается отношение количества получаемой эксергии в данном теплообменнике к количеству эксергии, получаемой в идеальном теплообменнике с бесконечно большой поверхностью теплообмена. Подобный подход принят и в работе [20], при этом формула для расчета эксергетической эффективности теплообменника будет иметь вид:

$$\eta_{\mathrm{ex,max,HRU}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}} - Ex_{\mathrm{oa}}}{Ex_{\mathrm{ra}} - Ex_{\mathrm{oa}}}. \tag{11}$$

В работах [20, 21] эксергетичекий КПД блока утилизации с учетом мощности, затрачиваемой на приводы вентиляторов, рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_{\mathrm{ex,f,el}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}} - Ex_{\mathrm{oa}}}{Ex_{\mathrm{ra}} - Ex_{\mathrm{ea}} + \sum \Delta N_{\mathrm{i}}^{\mathrm{fan}}}, \tag{12}$$

где $\sum \Delta N_{\mathrm{i}}^{\mathrm{fan}}$ – добавочная мощность вентиляторов, затрачиваемая на продувание каналов теплообменников. Также в работе [21] предлагается рассчитывать среднесезонное значение эксергетического КПД, рассчитанное с помощью времени стояния наружных температур в год.
В работе [22] в качестве показателя эксергетической эффективности применения теплоутилизатора в системах вентиляции предлагают следующее выражение:

$$S_{\mathrm{ex}} = \frac{Ex_{\mathrm{th,ev}} - Ex_{\mathrm{th,bv}}}{N_{\mathrm{HRU}} - N_{\mathrm{f}}}, \tag{13}$$

где $Ex_{\text{th,ev}}$ – потребность в термической эксергии при вытяжной вентиляции с естественным притоком воздуха; $Ex_{\text{th,bv}}$ – потребность в термической эксергии при сбалансированной вентиляции с теплоутилизатором; N_{HRU} – затраты электрической мощности на приводы вентилятора для системы вентиляции с теплоутилизаротом; N_{f} – затраты электрической мощности на привод вытяжного вентилятора. При этом результаты расчетов показали, что утилизация теплоты становится менее эффективной с эксергетической точки зрения при повышении температуры наружного воздуха и приближении ее к температуре в помещении. Поэтому целесообразно использовать теплоутилизатор только при достаточно низких температурах наружного воздуха, которые позволяют с помощью утилизации компенсировать дополнительные затраты электрической энергии.

В работе [23] вводятся понятия теплой и холодной эксергии. При этом эксергия, которая содержится в объеме воздуха при температуре выше температуры окружающей среды, – это способность термической энергии воздуха рассеиваться в окружающей среде (теплая эксергия). С другой стороны, эксергия, которая содержится в объеме воздуха при температуре ниже температуры окружающей среды, – это способность воздуха впускать термическую энергию окружающей среды (холодная эксергия). Первая ситуация является типичной для отопительного периода, вторая – для летнего. Также различают влажную и сухую эксергию по аналогии с теплой и холодной. Влажная эксергия – это способность объема воздуха с водяным паром рассеиваться в окружающей среде с более низким содержанием пара, а сухая – с более высоким содержанием пара.

Изученная литература по вопросам эксергетического анализа позволяет рассчитывать эксергетическую эффективность для теплоутилизаторов явной теплоты систем вентиляции. В данной статье на основе общепринятых подходов проводится анализ потоков эксергии и эффективности энтальпийного теплоутилизатора с учетом процессов тепло- и массообмена.

Эксергетический анализ системы вентиляции с мембранным рекуперативным теплообменником

Чтобы продемонстрировать разницу между простой и рациональной эффективностью, рассмотрим эксергетические потоки в установке приточно-вытяжной вентиляции с утилизатором теплоты (холода) и влаги вытяжного воздуха (рис. 1).

В теплообменнике эксергия одного потока теплоносителя повышается за счет снижения эксергии другого. При этом появляется потеря эксергии, которая связана с необратимым процессом тепломассообмена при конечных температурах и влагосодержаниях ($D_{\Delta t,d}$), гидравлическим сопротивлением ($D_{\Delta p}$) и передачей теплоты в окружающую среду через изоляцию (D_{loss}) [16, 17]. В нашем случае потери, связанные с гидравлическим сопротивлением, приводят к нагреванию теплоносителей, при этом эксергия частично возвращается в систему. Если считать, что корпус установки является хорошо теплоизолированным, то для рассматриваемых систем потери эксергии в окружающую среду будут равны нулю: D_{loss}=0.

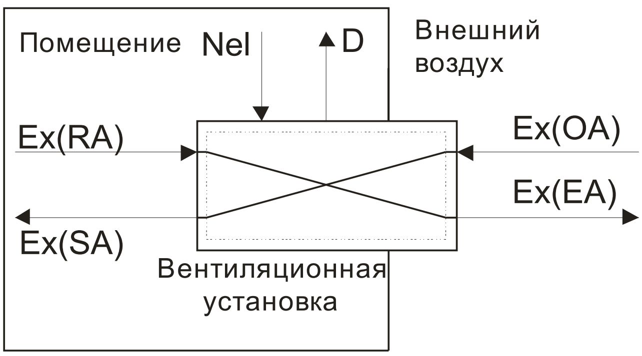


Рисунок 1. Входные и выходные потоки эксергии в вентиляционной установке

Для анализа эксергетической эффективности системы вентиляции с теплоутилизатором была выбрана установка с расходом воздуха 150 м^3/час, коэффициентами эффективности для холодного/теплого периода года: по явной теплоте η_t = 0,82 / 0,80, по полной теплоте η_h = 0,75 / 0,73 [24], которые используются при расчете параметров воздуха на выходе из установки. При данном расходе и работе установки в режиме «high» напор вентилятора составляет 65 Па, электрическая мощность – 90 Вт. При этом предполагается два варианта исследуемой системы: 1) ее границы совпадают с теплоизолированными границами корпуса установки, в котором находятся энтальпийный теплоутилизатор и вентиляторы с приводами; 2) собственно энтальпийный теплоутилизатор.

Параметры воздуха в помещении задавались постоянными для холодного ($t_{oa} \le 10$ °C) и теплого ($t_{oa} > 10$ °C) периодов года: t_{ra} = 20 / 24 °C, φ_{ra} = 40 / 45 % согласно работе [25]. Параметры наружного воздуха (окружающей среды) варьировались, при этом использовались почасовые значения температуры и влажности наружного воздуха для Киева (8760 значений, по данным IWEC) [26].

Для анализа зависимости удельной эксергии воздуха в помещении от параметров наружного воздуха, а именно температуры и влажности, были построены графики для холодного и теплого периодов года (рис. 2). На них видна ярко выраженная зависимость удельной эксергии от температуры на протяжении всего года и от влажности при температуре выше 25 °C.

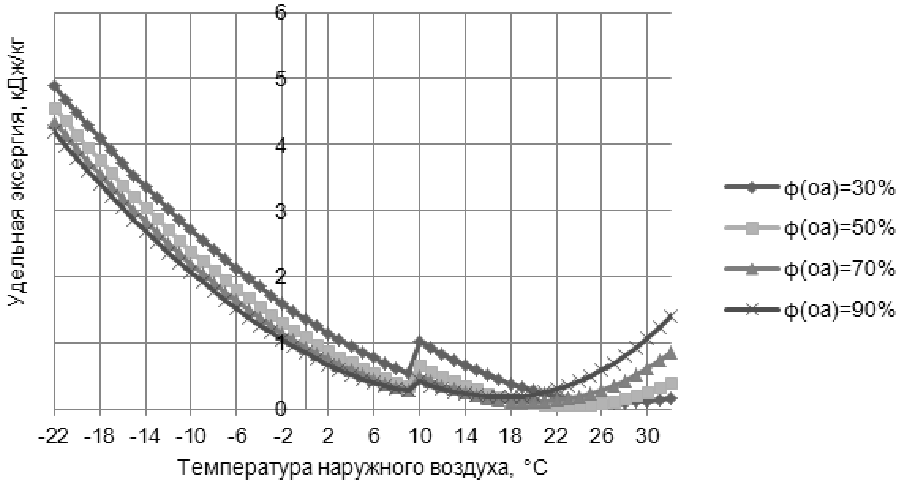


Рисунок 2. Удельная эксергия воздуха в помещении при различных температурах и влажностях наружного воздуха

Для анализа составляющих эксергии воздуха в помещении для климатических данных Киева были рассчитаны их значения для холодного ($t_{oa} \le 10$ °C) и летнего ($t_{oa} \ge 24$ °C) периодов года и построены их графики для одного дня из каждого периода, для наглядности также нанесены температура и влажность наружного воздуха (рис. 2).

В среднем для холодного/летнего периода года термическая часть составляет 78,8 / 9,8 %, механическая – 5,6 / 38,9 %, химическая – 15,6 / 51,3 %. Из полученных данных (рис. 3) следует вывод, что в холодный период года можно пренебрегать механической составляющей эксергии.

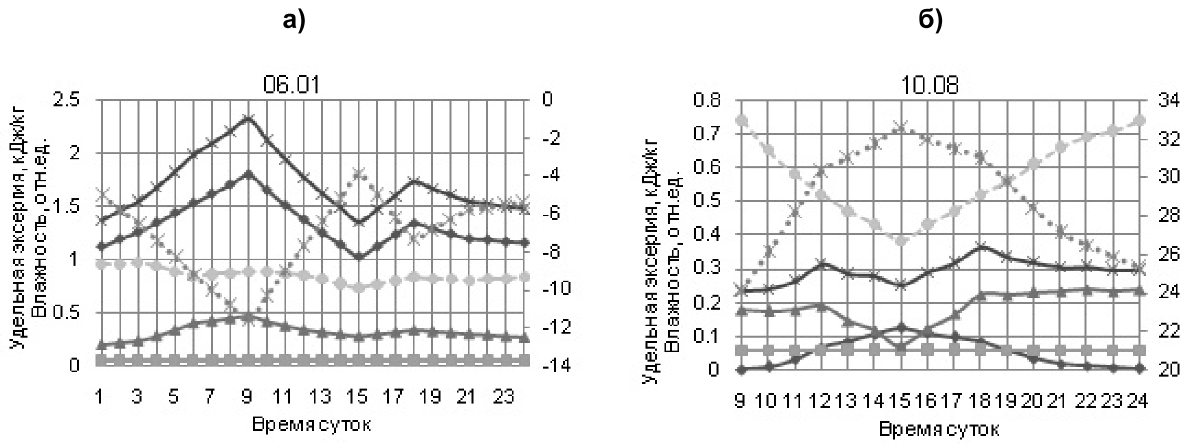


Рисунок 3. Относительная влажность (φ (oa), отн. ед.), температура наружного воздуха (t(oa)), общая (total) и составляющие удельной эксергии для воздуха в помещении для одного дня холодного (а) и теплого (б) периода года (IWEC)

В ночное время при снижении температуры наружного воздуха ниже температуры в помещении автоматически включается режим «байпас», и приточный воздух мимо теплообменника поступает в помещение (обеспечивая при этом «free cooling»). Поэтому ночные часы с точки зрения теплоутилизации не рассматриваются (рис. 3, б).

При температуре наружного воздуха ниже −10 °С возможна частичная заморозка теплообменника [24], поэтому через каждые 60 мин. приточный вентилятор выключается и в течение 10 мин. теплообменник обдувается теплым вытяжным воздухом. При достижении температуры −15°С и ниже для того, чтоб система функционировала нормально, необходим предварительный нагрев приточного воздуха до −9,9 °С. Пример учета преднагрева при расчете показателей эксергетической эффективности будет показан далее для температуры −22 ºС. В соответствии с метеоданными типичного года для Киева (IWEC) температура наружного воздуха не опускается ниже −15 °С, поэтому с помощью этих данных нельзя проанализировать режимы преднагрева наружного воздуха. Согласно Пособию к СНиП «Строительная климатология» [26] суммарное число часов стояния температур ниже −14,1 °С составляет 149 часов (3,1 % от общего числа часов стояния для зимнего режима < 10 °С). На рисунке 4 представлено число часов стояния наружных температур для Киева согласно [27] и IWEC. По данным графика видно, что при температурах ниже −4 °С повторяемость температур в IWEC ниже, чем в Пособии к СНиП, и ограничивается −15°С; при температуре выше 24 °С различие незначительное.

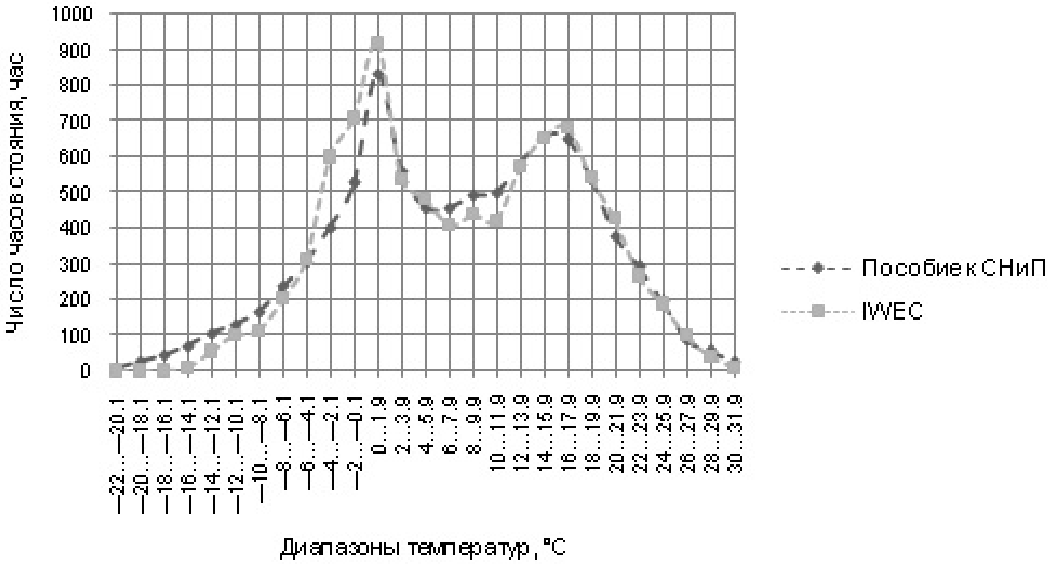


Рисунок 4. Число часов стояния температур наружного воздуха

Проанализировав известные подходы к определению коэффициентов эксергетической эффективности с учетом наличия процессов тепломассообмена в установке, запишем расчетные формулы для теплообменника (при этом термическая и химическая составляющие эксергии наружного воздуха равны 0):

$$\eta_{\mathrm{ex,u}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}}{}^{(\mathrm{th+ch})} + Ex_{\mathrm{ea}}{}^{(\mathrm{th+ch})}}{Ex_{\mathrm{ra}}{}^{(\mathrm{th+me+ch})} + Ex_{\mathrm{oa}}{}^{(\mathrm{me})}}; \tag{14}$$

$$\eta_{\mathrm{ex,f}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}}{}^{(\mathrm{th+ch})}}{Ex_{\mathrm{ra}}{}^{(\mathrm{th+me+ch})} - Ex_{\mathrm{ea}}{}^{(\mathrm{th+ch})} + Ex_{\mathrm{oa}}{}^{(\mathrm{me})}}; \tag{15}$$

$$\eta_{\mathrm{ex,max}} = \frac{Ex_{\mathrm{sa}}{}^{(\mathrm{th+ch})}}{Ex_{\mathrm{ra}}{}^{(\mathrm{th+me+ch})} + Ex_{\mathrm{oa}}{}^{(\mathrm{me})}}. \tag{16}$$

Для системы в целом (с учетом подвода энергии на приводы вентиляторов):

$$\eta_{\text{ex,u,el}} = \frac{Ex_{\text{sa}}{}^{\text{(th+ch)}} + Ex_{\text{ea}}{}^{\text{(th+ch)}}}{Ex_{\text{ra}}{}^{\text{(th+ch)}} + N_{\text{fan}}}; \tag{17}$$

$$\eta_{\text{ex,f,el}} = \frac{Ex_{\text{sa}}{}^{\text{(th+ch)}}}{Ex_{\text{ra}}{}^{\text{(th+ch)}} - Ex_{\text{ea}}{}^{\text{(th+ch)}} + N_{\text{fan}}}; \tag{18}$$

$$\eta_{\text{ex,max,el}} = \frac{Ex_{\text{sa}}{}^{\text{(th+ch)}}}{Ex_{\text{ra}}{}^{\text{(th+ch)}} + N_{\text{fan}}}. \tag{19}$$

Особенность данных формул состоит в учете изменения влагосодержания воздуха и механической составляющей эксергии, или затрат мощности на приводы вентиляторов.

На рисунках 5, 6 изображена зависимость показателей простой, рациональной и максимальной эксергетической эффективности для теплообменника и системы в целом от параметров наружного воздуха. При этом для холодного периода в качестве определяющего параметра была выбрана температура (преобладает термическая эксергия), а для летнего – влагосодержание (химическая).

а) б)

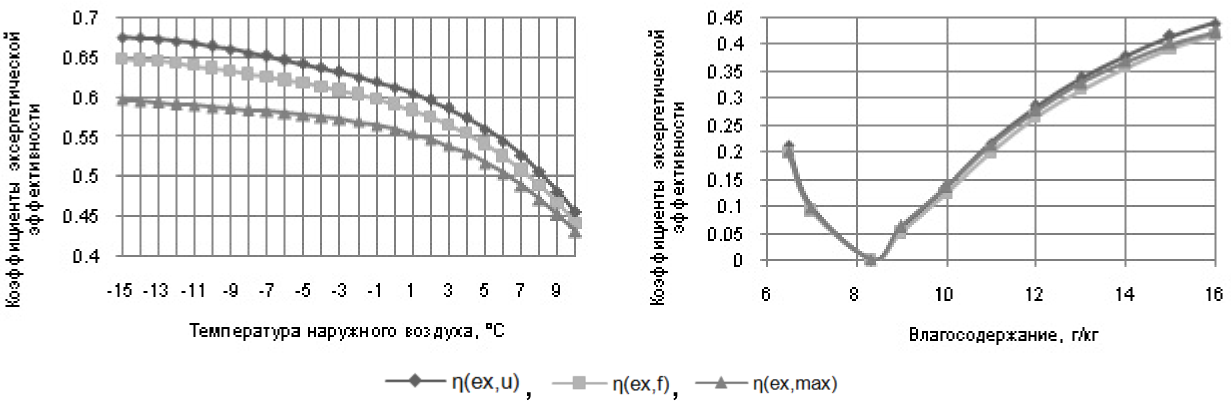


Рисунок 5. Показатели эксергетической эффективности теплообменника (14)–(16) для зимнего (а) и летнего (б) режимов

Как видно из рисунка 5а, показатели эксергетической эффективности увеличиваются при уменьшении температуры наружного воздуха, на рисунке 5б показатели близки нулю, если влагосодержание наружного воздуха равно влагосодержанию в помещении, и увеличиваются при увеличении разницы во влагосодержании. Рисунок 6 показывает, что при учете затрат электроэнергии на приводы вентиляторов показатели эксергетической эффективности значительно ниже.

а) б)

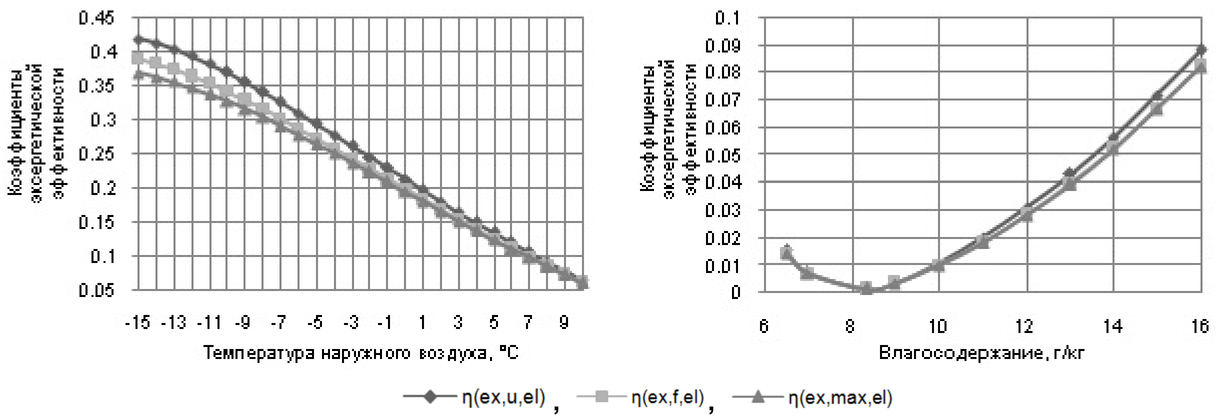


Рисунок 6. Показатели эксергетической эффективности (17)–(19) для зимнего (а) и летнего (б) режимов с учетом затрат электрической мощности на приводы вентилятров N_{fan}

Так как на рисунках 5а и 6а изображены результаты расчетов для зимнего режима, а на рисунках 5б и 6б – для летнего, сопоставлять эти части рисунков не совсем корректно ввиду значительного различия в температурных и влажностных показателях.

Также были построены зависимости потоков эксергии (воздуха в помещении, приточного и выбрасываемого, мощности приводов вентиляторов) в системе вентиляции с мембранным теплоутилизатором для зимнего (а) и летнего (б) режима от параметров наружного воздуха (рис. 7).

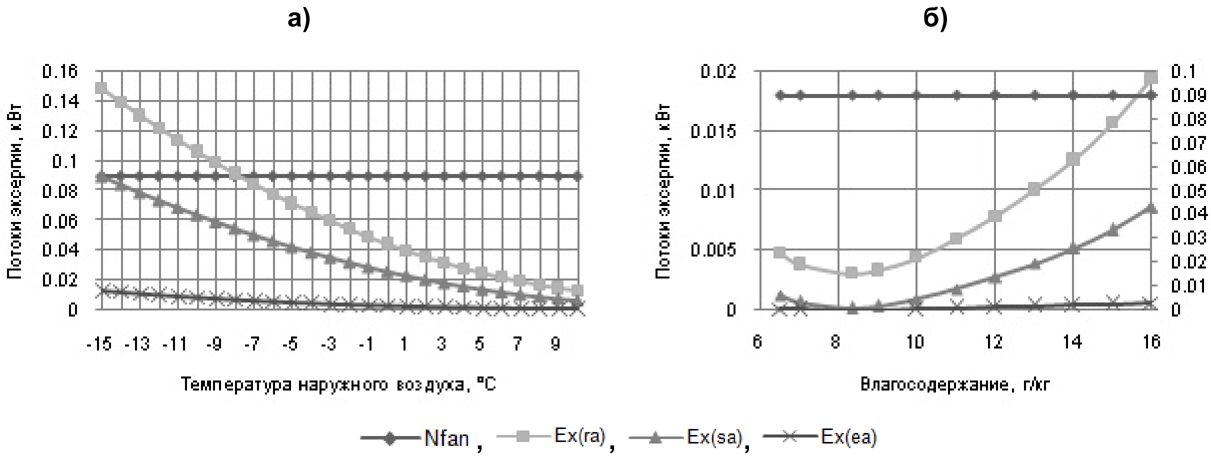


Рисунок 7. Потоки эксергии в вентиляционной системе с теплоутилизатором для зимнего (а) и летнего (б) режимов

При наружной температуре −22 ºС мощность преднагревателя составляет 0,6 кВт (при условии нагрева до температуры −9,9 ºС). Учет мощности преднагревателя снижает показатель функциональной эксергетической эффективности для системы в целом (18) с 0,46 до 0,17. Данные IWEC не дают возможности расчета температурного диапазона ниже −15 ºС, а возможность использования для энтальпийных теплоутилизационных систем Пособия к СНиП «Строительная климатология» [26] ограничена в связи с отсутствием данных по влажности для часов стояния температур.

Для нахождения средневзвешенных сезонных коэффициентов эксергетической эффективности были использованы упомянутые метеорологические данные для Киева. Для данных IWEC значения средневзвешенных коэффициентов эксергетической эффективности за холодный и летний период года при условии постоянного использования установки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значение средневзвешенных коэффициентов эксергетической эффективности

Коэффициенты эксергетической эффективности	t_{oa} ≤ 10 °C	t_{oa} ≥ 24 °C
$\eta_{ex,u}$	0,594	0,217
$\eta_{ex,f}$	0,573	0,202
$\eta_{ex,max}$	0,543	0,197
$\eta_{ex,u(el)}$	0,207	0,027
$\eta_{ex,f(el)}$	0,192	0,025
$\eta_{ex,max(el)}$	0,188	0,024

Коэффициенты эксергетической эффективности для летнего периода имеют значительно меньшее значение, чем для зимнего (за счет меньшей разницы температур наружного воздуха и в помещении) особенно при учете затрат электрической мощности на приводы вентиляторов.

Выводы

Рассмотрены термическая, механическая и химическая составляющие потоков эксергии воздуха в помещении и их изменение в зависимости от параметров наружного воздуха (температуры и влажности) для разных периодов года с использованием климатических данных IWEC для Киева. При этом в зимнее время преобладает термическая составляющая, а в летнее – химическая, при условии поддержания требуемых параметров температуры и влажности с помощью климатических систем.

Климатические данные IWEC дают информацию по параметрам наружного воздуха с интервалом в один час. Однако для Киева минимальная температура воздуха по IWEC составляет −15 °С при температуре воздуха наиболее холодной пятидневки −22 °С согласно [28]. Это несоответствие следует учитывать при выборе параметров оборудования систем вентиляции с теплоутилизацией, в том числе для преднагрева наружного воздуха перед теплообменником.

Проведен анализ различных подходов к определению эксергетической эффективности систем вентиляции с энтальпийными теплоутилизаторами, а именно рассмотрены универсальная, функциональная и максимальная эксергетическая эффективность при разных границах системы (теплообменник и установка в целом), в разное время года и зависимость этих показателей от температуры и влагосодержания наружного воздуха (точки отсчета эксергии). Также приведены средневзвешенные показатели эксергетической эффективности для холодного и летнего периода года для Киева.

Подходы к эксергетическому анализу, изложенные в данной статье, позволяют сравнивать между собой разные модели теплоутилизаторов на основе долгосрочных (сезонных) эксергетических показателей эффективности.

Литература

1. Vosough A., Noghrehabadi A., Ghalambaz M., Vosough S. Exergy Concept and its Characteristic // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering. 2011. Vol. 2. No. 4. Pp. 47–52.
2. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. М.: Энергия, 1968. 280 с.
3. Ren C.Q., Tang G.F., Li N.P., Zhang G.F., Yang J. Analysis Of Exergy Of Moist Air And Energy Saving Potential in HVAC by Evaporative Cooling or Energy Recovery // International Journal on Architectural Science. 2001. Vol. 2. No. 4. Pp. 113–117.
4. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства: Учеб. пособие. СПб.: СПбГАХТП, 1998. 146 с.
5. Torio H., Angelotti A., Schmidt D. Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings // Energy and Building. 2009. No. 41. Pp. 248–271.
6. Sakulpipatsin P., Itard L.C.M, Van Der Kooi H.J., Luscuere P.G., Boelman E.C. A reference environment for the calculation of the exergy value of air in buildings // ASHRAE Transactions. 2009. Vol. 115. Issue 1. Pp. 10.
7. Sakulpipatsin P., Boelman E., Itard L., van der Kooi H.J. Selection of a reference environment for the calculation of the exergy value of indoor air in buildings // Proceedings of the 3rd Conference on International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-3), 1 – 5 July, Evora, Portugal. Portugal, 2007.
8. Sakulpipatsin P., van der Kooi H.J., Itard L.C.M., Boelman E.C. The influence of possible definitions of a reference environment to determine the exergy of air in buildings // International Journal of Exergy. 2008. Vol. 5. No. 3. Pp. 275–295.
9. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
10. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие / Под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. Киев: Наукова думка, 1991. 359 с.
11. Boelman E. C. Exergy needs for winter ventilation in buildings // Proceedings of the Sustainable Building 2002 Conference. Paper No.489.
12. Sakulpipatsin P., Cauberg J.J.M., van der Kooi H.J., Itard L.C.M. Application of the Exergy Concept to Design Efficient Mechanical Exhaust Ventilation Systems // Proceedings: Building Simulation. 2007. Pp. 363–370.
13. Sakulpipatsin P., Boelman E.C., Cauberg J.J.M. Exergy analysis as an assessment tool of heat recovery of dwelling ventilation systems // International Journal of Ventilation. 2007. Vol. 6. No. 1. Pp. 77–86.
14. Boelman E.C., Sakulpipatsin P. Critical analysis of exergy efficiency definitions applicable to buildings and building services // The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. 2004. Pp. 1–6.
15. Woudstra N. The Quality of Energy // In: Stougie L. Energy Efficiency and the Quality of Energy in the Food Processing Industry. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2002. Pp. 15–18.

16. Кручинин М.И., Шадрина Е.М. Теоретические основы энерго- и ресурсосбережения. Эксергетичекий анализ теплообменных аппаратов: учеб. пособие / ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново. 2007. 44 с.

17. Долинский А.А., Драганов Б.Х. Оптимизация энергетических систем на основе теоретико-графовых построений. К.: Академпериодика, 2013. 67 с.

18. Грассман П. К обобщенному определению понятия коэффициента полезного действия // В кн.: Вопросы термодинамического анализа (эксергетический метод) / Под. ред. В.М. Бродянского. М.: Мир, 1965. 251 с.

19. Семенюк Л.Г. Термодинамическая эффективность теплообменников // Инженерно-физический журнал. 1990. Т. 59. №6. С. 935–942.

20. Цуй Янь Мэй, Иванов О.П. Применение h-d и s-d диаграммы для расчета утилизаторов // Вестник Международной Академии Холода. 2007. Выпуск 4. С. 25–26.

21. Иванов О.П. Выбор оборудования для утилизации тепла и холода в системах кондиционирования // Холодильная техника. 1982. №2. С.12–15.

22. Sakulpipatsin P., Boelman E.C., Cauberg H. Heat Recovery in Residential Ventilation Systems from an Exergy Perspective // Healthy buildings. 2006. Vol. V. Pp. 269–274.

23. Shukuya M. Exergy Concept and its Application to the Built Environment // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Issue 7. Pp. 1545–1550.

24. Сайт представительства компании Mitsubishi Electric Украина. URL: http://www.mitsubishi-aircon.com.ua

25. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. К.: Мінрегіон України, 2014.

26. IWEC file for Kiev. URL: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=UKR/cname=Ukraine (дата обращения: 01.03.2014).

27. Справочное пособие к СНиП 2.01.01-82 «Строительные климатология и геофизика». М., 1989.

28. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология». Дата введения 2000-01-01.

Ирина Олеговна Суходуб, г. Киев, Украина
+38(044)4549690; эл. почта: ira_krot@ukr.net

Валерий Иванович Дешко, г. Киев, Украина
+38(044)4068250; эл. почта: te@kpi.ua

Метод обоснования рационального варианта пунктов мониторинга технического состояния инженерных систем уникальных зданий и сооружений

К.т.н., доцент В.С. Солдатенко;
к.т.н., начальник кафедры Метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники В.Н. Харин,
ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского»

Аннотация. При обязательном мониторинге технического состояния несущих конструкций уникальных зданий и сооружений необходимо также проведение аналогичных мероприятий для объектов их инженерных систем. Для этого создаются пункты мониторинга. Ставится задача выбора рационального состава средств измерений с учетом ресурсных ограничений и наличия нескольких критериев рациональности. Необходимо также учитывать условия существенной неопределенности проектирования и создания уникальных зданий и сооружений. Это предполагает участие экспертов и использование для обработки результатов экспертизы теории нечеткой логики.

В статье рассматривается подход к формированию рационального варианта приборного состава пункта мониторинга на основе анализа интегральной эффективности используемых методик измерений для контроля технического состояния инженерных систем. Предложен способ перехода от частных показателей эффективности средств контроля к показателям интегральной эффективности пункта мониторинга на основе модели базы знаний в форме продукционных правил вывода. Такой подход позволяет определять наиболее эффективную измерительную методику для каждого объекта уникального здания по совокупности отдельных показателей, которые оцениваются экспертами. Полученные результаты позволяют существенно снизить стоимость решения задачи обоснования приборной базы пунктов мониторинга статистическими методами за счет отказа от длительных натурных испытаний.

Ключевые слова: техническое состояние инженерных систем; измерительная методика; лингвистическая переменная; база знаний; продукционное правило

Введение

Для уникальных зданий и сооружений наряду с обязательным мониторингом технического состояния несущих конструкций [1] необходимо также проведение аналогичных мероприятий для объектов инженерных систем. Одним из новых направлений решения указанной проблемы является дополнение известных методов контроля [1–6] общего назначения применением специализированного оборудования (рис. 1, 2) неразрушающего контроля и диагностирования объектов [4, 5, 6].

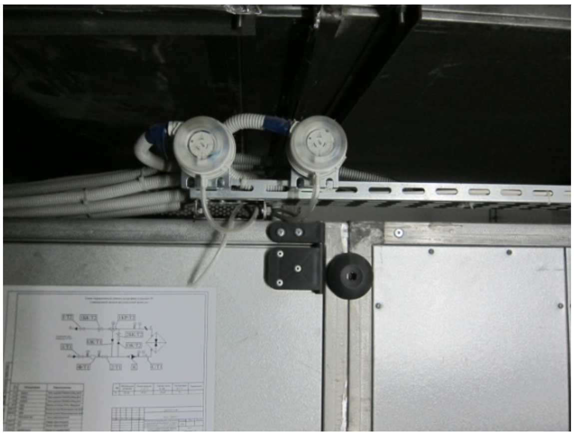


Рисунок 1. Манометры для контроля загрязненности воздушных фильтров

Рисунок 2. Приборы контроля работоспособности калорифера (термометры, манометры)

Это позволяет реализовать комплексное экспресс-тестирование и оценивание технического состояния инженерных систем исследуемого здания (сооружения).

Указанный подход может быть реализован в форме внедрения модульных многофункциональных комплексов средств измерения и диагностирования, которые представляют собой стационарные или мобильные пункты мониторинга уникальных зданий и сооружений. Однако в настоящее время отсутствуют утвержденные нормативными документами методы обоснования состава приборной базы этих объектов. Поэтому формирование приборной базы пунктов мониторинга для уникальных зданий и сооружений в условиях финансовых и иных ограничений представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Известные методы, которые применяются для формирования состава пунктов мониторинга уникальных зданий и сооружений, разделим на три группы [7–12]. К первой из них относятся подходы, базирующиеся на использовании знаний и интуиции специалистов. Наиболее часто используются следующие методы: «мозговой атаки», сценариев, экспертных оценок (включая SWOT-анализ), Дельфи, «дерева целей», морфологического анализа и ряд других. Во вторую группу можно включить методы формализованного представления пунктов мониторинга (формального моделирования исследуемых процессов). Речь в данном случае идет об описании исследуемых сложных технических систем с помощью математических, экономико-математических методов и моделей их исследования. Эти методы опираются на аналитические, статистические, теоретико-множественные, лингвистические и семиотические, а также графические описания процедур диагностирования оборудования. Третью группу способов обоснования состава пунктов мониторинга представляют так называемые комплексированные методы. Их основой является математический аппарат комбинаторики, ситуационного моделирования, топологии, графосемиотики и др. Свое название они получили от объединения экспертных и формализованных методов.

Анализ особенностей перечисленных методов привел к следующему выводу. Задаче формирования приборной базы пунктов мониторинга для уникальных зданий и сооружений в наибольшей мере отвечают методы, базирующиеся на использовании лингвистических (нечетких) конструкций. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, для данного типа объектов характерна неопределенность их технического состояния, уменьшить которую можно с помощью нечеткой логики. Во-вторых, имеется некоторая исходная информация о свойствах предполагаемых для использования в составе пункта мониторинга средств измерений. Эти сведения можно дополнить экспертными заключениями об ожидаемом уровне эффективности анализируемых измерительных методик. В-третьих, в рамках второй группы методов исследования нецелесообразно применение статистических подходов к решению задачи. Стоимость необходимых экспериментов при этом может быть слишком велика для малосерийных и уникальных зданий и сооружений. В-четвертых, использование комбинационных методов последней группы приводит к необоснованному усложнению расчетных процедур и интерпретации получаемых результатов моделирования. В-пятых, применение лингвистических моделей позволяет осуществлять на строго научной основе выбор рационального варианта приборной базы с учетом нескольких критериев предпочтительности. Основным отличием этих моделей от известных подходов является применение сравнительного анализа эффективности методик измерения параметров состояния объектов при принятии решения.

Для обоснования рационального варианта состава пункта мониторинга технического состояния инженерных систем зданий и сооружений в настоящей статье предложено использовать модель знаний в форме продукционных правил перехода от частных показателей эффективности отдельных измерительных методик к формированию комплексного заключения об эффективности приборной базы в целом. Решение указанной задачи включает три последовательных этапа:

1) формирование совокупности показателей предпочтительности вариантов приборной базы контроля технического состояния инженерных систем уникального здания (сооружения);
2) определение множества потенциально пригодных для определения технического состояния инженерных систем уникального здания (сооружения) методик измерений;
3) обоснование рационального варианта структуры приборной базы контроля технического состояния инженерных систем на основе применения модели знаний о влиянии частных показателей отдельных измерительных методик на итоговое заключение о составе средств измерений.

Рассмотрим решение описанной задачи на основе применения аппарата нечеткой логики [13–17].

Математическая постановка задачи

Предположим, что между фактом определения технического состояния конкретного объекта – инженерной системы уникального здания (сооружения) – и результатами измерений его параметров состояния с помощью средств контроля, применяемых при измерительной методике, существует некоторая взаимосвязь. Характер указанной связи определяют эксперты на основе имеющихся у них опыта и знаний. При этом свое мнение они выражают в терминах естественного языка.

Необходимо на основе полученных высказываний специалистов построить математическую модель, позволяющую выявлять причинно-следственные связи между фактом определения технического состояния и результатами измерений параметров, выполненных с помощью средств контроля пункта мониторинга, которые влияют на это событие. Результаты такого моделирования должны быть применимы для принятия решений по составу средств измерений и использованию измерительных методик для определения технического состояния обследуемых объектов уникального здания (сооружения). Рассмотрим математическую постановку указанной задачи.

Пусть число объектов инженерных систем уникального здания (сооружения) равно N. Техническое состояние каждого i-го из N объектов может определяться с помощью K_{ij} ($i=1(1)N$, $j=(1(1)M_i)$ измерительных методик, использование каждой из которых подразумевает наличие n_{ijk} ($i=1(1)N$, $j=(1(1)M_i$, $k=1(1)L_{ij}$) средств измерений. Через M_i ($i=1(1)N$) обозначается число типов измерительных методик для i-го объекта; через L_{ij} – число средств измерений, необходимых для реализации j-й измерительной методики ($i=1(1)N$, $j=(1(1)M_i$). Введенное описание иллюстрируется схемой на рисунке 3, где в обозначениях средств контроля указаны значения их индексов.

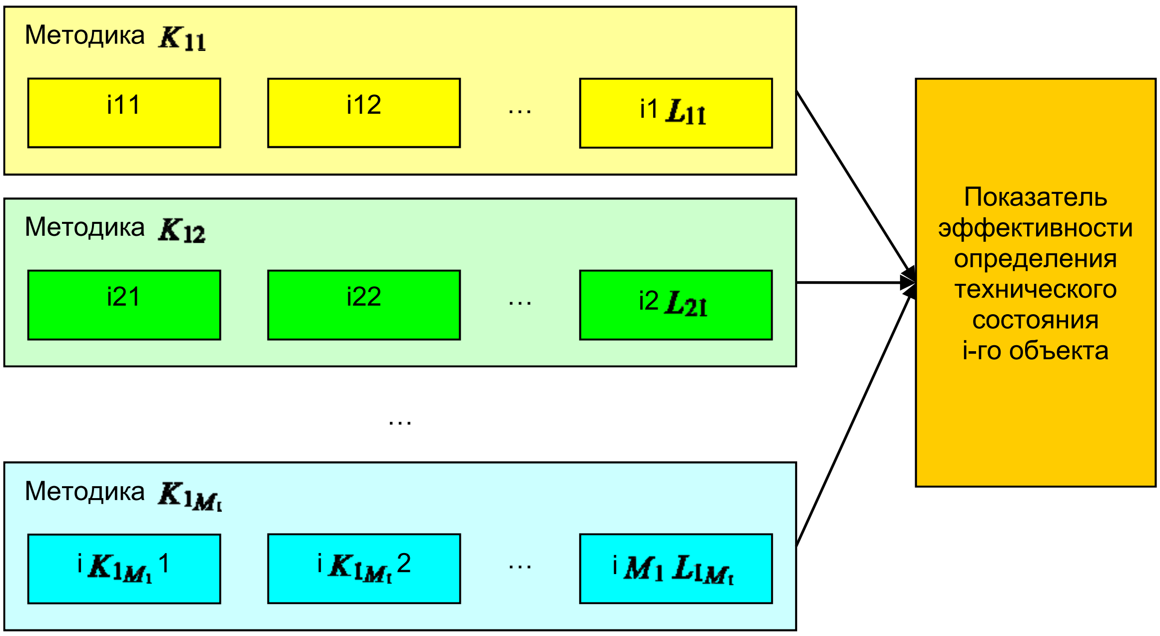


Рисунок 3. Характер влияния частных показателей эффективности измерительных методик на комплексный показатель эффективности определения технического состояния объекта

Будем полагать, что каждая измерительная методика характеризуется несколькими свойствами эффективности ее применения. К таким свойствам, например, могут относиться оперативность контроля; стоимость реализации методики; результативность контроля объекта инженерной системы [18–22]. Пусть для перечисленных характеристик применительно к i-му объекту инженерной системы используются следующие показатели эффективности применения j-й методики: оперативность оценивается средней длительностью t_{ij} контроля технического состояния объекта; показателем стоимости выступает средняя величина затрат c_{ij} на формирование и реализацию измерительной методики; вероятность p_{ij} правильного определения технического состояния контролируемого объекта – для результативности контроля ($j=(1(1)K_i$, $i=1(1)N$). В силу уникальности здания указанные показатели будем рассматривать как нечеткие величины $\underset{\sim}{t}_{ij}$, $\underset{\sim}{c}_{ij}$ и $\underset{\sim}{p}_{ij}$ ($j=(1(1)K_i$, $i=1(1)N$). В соответствии с правилами нечеткой логики описание показателей имеет следующий вид [23]:

$$\underset{\sim}{t}_{ij}=\{<t_{ij},\ \mu_{\underset{\sim}{t}_{ij}}(t_{ij})>\},\quad j=(1(1)K_i,\ i=1(1)N; \tag{1}$$

$$\underset{\sim}{c}_{ij}=\{<c_{ij},\ \mu_{\underset{\sim}{c}_{ij}}(c_{ij})>\},\quad j=(1(1)K_i,\ i=1(1)N; \tag{2}$$

$$\underset{\sim}{p}_{ij}=\{<p_{ij},\ \mu_{\underset{\sim}{p}_{ij}}(p_{ij})>\},\quad j=(1(1)K_i,\ i=1(1)N, \tag{3}$$

где символом μ обозначена функция принадлежности (ФП) соответствующей нечеткой величины.

Рассмотрим структуру каждого из показателей (1)–(3). Показатель оперативности контроля t_{ij} может включать среднее времени подготовки объекта к проведению контроля; среднее времени измерения; среднее времени обработки результатов контроля технического состояния i-го объекта с помощью j-й измерительной методики ($j=(1(1)K_i$, $i=1(1)N$). Структуру затрат c_{ij} на формирование и реализацию j-й методики для i-го объекта ($j=(1(1)K_i$, $i=1(1)N$) можно представить схемой (рис. 4).

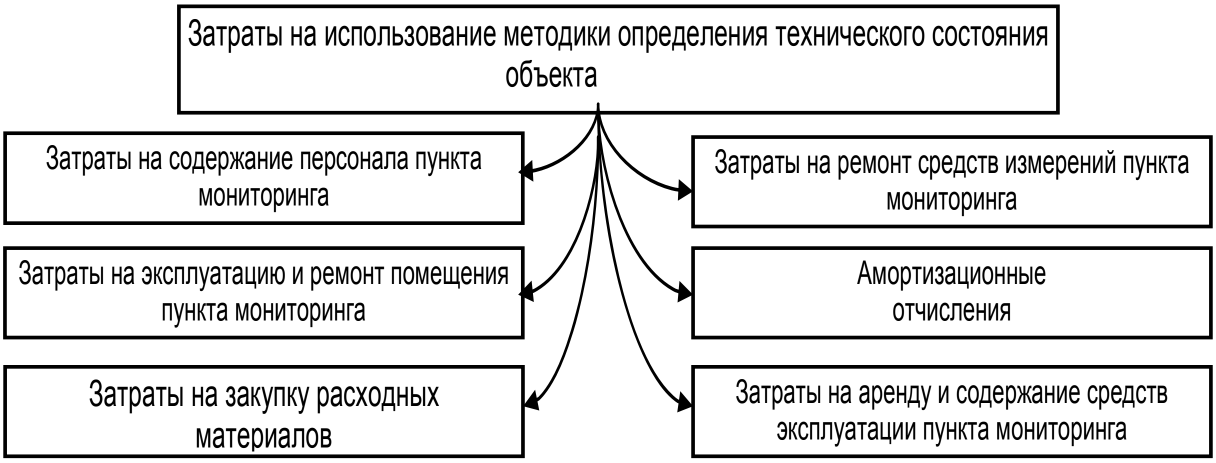


Рисунок 4. Затраты на использование методики измерений

Показатель результативности p_{ij} [20, 22] отражает ожидаемые значения показателей полноты и достоверности контроля параметров технического состояния объектов . На вероятность правильного определения технического состояния влияют особенности методики измерений, а также условия проведения измерений.

Введем обобщенные показатели эффективности определения технического состояния i-го объекта для всей совокупности измерительных методик: $\underset{\sim}{T}_i$ – показатель оперативности; $\underset{\sim}{C}_i$ – показатель стоимости (ресурсоемкости); $\underset{\sim}{P}_i$ – показатель результативности контроля. Эти показатели имеют нечеткую природу, поскольку определяются с помощью нечетких значений аналогичных частных показателей измерительных методик для рассматриваемого объекта.

Установим нечеткие отношения между элементами нечетких множеств $\underset{\sim}{t}_{ij}$, $\underset{\sim}{c}_{ij}$, $\underset{\sim}{p}_{ij}$ и множествами $\underset{\sim}{T}_i$, $\underset{\sim}{C}_i$ и $\underset{\sim}{P}_i$ ($j=(1(1)K_i$, $i=1(1)N$).

$$\underset{\sim}{T}_i = \underset{\sim}{\mathbf{t}} * R_t ; \tag{4}$$

$$\underset{\sim}{C}_i = \underset{\sim}{\mathbf{c}} * R_C ; \tag{5}$$

$$\underset{\sim}{P}_i = \underset{\sim}{\mathbf{p}} * R_p , \tag{6}$$

где символом * обозначается применение правила композиции нечеткого вывода [17, 20];
матрицы $\underset{\sim}{\mathbf{t}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{c}}$ и $\underset{\sim}{\mathbf{p}}$ – матрицы нечетких значений соответствующих частных показателей эффективности измерительных методик по отношению к средствам контроля, используемым в составе этих методик;
матрицы R_t, R_c, R_p – матрицы нечетких отношений между элементами множеств частных и обобщенных показателей эффективности измерительных методик.

Для получения нечетких значений показателей эффективности $\underset{\sim}{T}_i$, $\underset{\sim}{C}_i$ и $\underset{\sim}{P}_i$ $(i = 1(1)N)$ необходимо наличие базы знаний [23–25], позволяющей сформировать соотношения (4)–(6).

Рассмотрим, как представить модель знаний для описания взаимосвязи между частными и обобщенными показателями эффективности измерительных методик.

Модель знаний для формирования значений показателей эффективности

Рассмотрим модель знаний для формирования совокупности потенциально пригодных средств контроля в форме продукционных правил вывода. Будем исходить из того, что значения каждой из нечетких переменных $\underset{\sim}{t}_{ij}$, $\underset{\sim}{c}_{ij}$, $\underset{\sim}{p}_{ij}$ для измерительной методики формируются на основе соответствующих частных показателей эффективности $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$, $\underset{\sim}{\sigma}_{ijk}$ и $\underset{\sim}{\pi}_{ijk}$ каждого из средств контроля, входящих в ее состав ($i = 1(1)N$, $j = (1(1)K_i$, $k = 1(1)L_{ij}$), как это представлено на схеме (рис. 3).

Осуществим формализованное представление экспертных знаний в виде системы правил нечеткой логики. Это позволяет сопоставить значения частных показателей $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$, $\underset{\sim}{\sigma}_{ijk}$ и $\underset{\sim}{\pi}_{ijk}$ средств контроля значениям показателей измерительных методик $\underset{\sim}{t}_{ij}$, $\underset{\sim}{c}_{ij}$, $\underset{\sim}{p}_{ij}$ по каждому контролируемому объекту инженерной системы . Задачу можно решить на основе формирования и последующего использования нечеткой базы знаний – носителя экспертной информации о предполагаемой эффективности измерительных методик для определения технического состояния контролируемых объектов.

Представим показатели $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$, $\underset{\sim}{\sigma}_{ijk}$ и $\underset{\sim}{\pi}_{ijk}$ как лингвистические переменные с некоторым множеством термов. Термы должны соответствовать уровням частной эффективности выполнения контроля [26, 27]. Каждый терм соответствующей лингвистической переменной конкретного средства контроля имеет свою функцию принадлежности. Установим для уменьшения размерности задачи, что число термов для рассматриваемых лингвистических переменных одинаково и равно H. Например, нечеткая переменная $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$ может описываться лингвистической переменной вида «оперативность контроля i-го объекта с помощью средства номер k в составе измерительной методики номер j». Термы лингвистической переменной $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$ в этом случае представляют собой высказывания «низкий уровень оперативности», «средний уровень оперативности» и т. д. Каждому l-му терму лингвистической переменной $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$ соответствует функция принадлежности $\mu^{(l)}_{\underset{\sim}{\tau}_{ijk}}$ $(l = 1(1)H)$. Тогда нечеткая переменная $\underset{\sim}{t}_{ij}$ «оперативность контроля ТС i-го объекта с помощью измерительной методики номер j» имеет свою функцию принадлежности, формируемую на основе функции принадлежности каждого из средств контроля, входящих в состав j-й измерительной методики. Для формирования указанной функции принадлежности будем использовать операцию импликации [24, 25]

$$\underset{\sim}{\tau}_{ijk} \to \underset{\sim}{t}_{ij} \text{ (если — } \underset{\sim}{\tau}_{ijk}\text{, то } \underset{\sim}{t}_{ij}\text{).} \tag{7}$$

В этой логической операции условием (антецедентом) выступает частный показатель эффективности средства контроля $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$, а заключением (консеквентом) – показатель эффективности $\underset{\sim}{t}_{ij}$ применения измерительной методики в целом. Аналогичные логические построения должны быть выполнены и для остальных показателей эффективности.

Процедуру использования нечеткого логического вывода при использовании указанных продукционных правил для объекта уникального здания (сооружения) разделим на два этапа: обобщение и заключение. На этапе обобщения логического вывода следует определить степень принадлежности всего антецедента правила (для средств контроля, входящих в состав измерительной методики). Будем использовать оператор вычисления минимального значения степени принадлежности среди всех нечетких переменных $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$, которые формируют конкретное продукционное правило $\underset{\sim}{\tau}_{ijk} \to \underset{\sim}{t}_{ij}$. Это объясняется тем, что в данном случае используемые переменные $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$ модели (6) объединяются логическим оператором И. К одному и тому же результату – величине показателя эффективности (в данном случае – оперативности) контроля технического состояния $\underset{\sim}{T}_i$ ($i = 1(1)N$) – приводит выполнение K_i измерительных методик. Поэтому все продукционные правила объединены логической связкой ИЛИ. В этом случае необходимо применять оператор вычисления максимального значения степени принадлежности результата контроля среди всех продукционных правил [18, 24, 25].

Таким образом, на этапе заключения (логического вывода) будем вычислять значение консеквента $\underset{\sim}{T}_i$ ($i = 1(1)N$). Исходными данными для этой процедуры служат значения степеней принадлежности антецедентов правил, полученные применительно к каждому из возможных результатов $\underset{\sim}{t}_{ij}$ ($i = 1(1)N$, $j = (1(1)K_i$). Результат нечеткого вывода при этом будет также нечетким. Он представляется соответствующим термом лингвистической переменной $\underset{\sim}{T}_i$. В данном случае следует применять правило выбора в качестве консеквента такого показателя $\underset{\sim}{t}_{ij}$, который имеет максимальное значение функции принадлежности. Таким образом, нечеткая база знаний для показателя $\underset{\sim}{T}_i$ эффективности (оперативности) контроля для i-го объекта инженерной системы здания (сооружения) описывается с помощью операций $\cup$ (ИЛИ) и $\cap$ (И) в следующей компактной форме [12, 18, 19]:

$$\bigcup_{j=1}^{K_j}\left[\bigcap_{k=1}^{L_{ij}}\left(\underset{\sim}{\tau}_{ijk} = a_{ijk}^{(l)}\right)\right] \to \mathbf{T} = T_i^{(m)}, \quad i = 1(1)N, \tag{8}$$

где $a_{ijk}^{(l)}$ – l-й терм нечеткой лингвистической переменной $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$; $T_i^{(m)}$ – m-й терм лингвистической переменной показателя оперативности контроля i-го объекта $\underset{\sim}{T}_i$.

Переход от нечеткой базы знаний к системе нечетких логических выражений $\underset{\sim}{T}_i$ в соответствии с выражением (8) будем осуществлять с помощью расчетного соотношения

$$\mu_{\underset{\sim}{T}_i}^{(m)}(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{K_i}) = \underset{j=1}{\overset{K_i}{\vee}}\left(\underset{k=1}{\overset{L_{ij}}{\wedge}}\left(\mu_{\underset{\sim}{\tau}_{ijk}}^{(l)}\right)\right),\ i = 1(1)N, \tag{9}$$

где $\mu^{(m)}_{\underset{\sim}{T}_i}(t_{i1}, t_{i2}, ..., t_{K_i})$ – функция принадлежности вектора значений термов показателя оперативности контроля технического состояния i-го объекта для решения $T_i^{(m)}$ $(i = 1(1)N$, $m = 1(1)H$); $\mu^{(k)}_{\underset{\sim}{\tau}_{ijk}}$ – ФП переменной $\underset{\sim}{\tau}_{ijk}$ для ее нечеткого терма $a_{ijk}^{(l)}$ $(i = 1(1)N$; $j = (1(1)K_i$, $k = 1(1)L_{ij}$, $l = 1(1)H$); $\vee(\wedge)$ – операции максимизации (минимизации) соответствующих множеств значений рассматриваемых величин.

После того, как будут сформированы значения функции принадлежности вектора значений термов показателей эффективности контроля технического состояния по всем объектам инженерных систем здания, необходимо решить задачу выбора состава средств контроля для этого здания в целом. Рассмотрим применение описанной модели на расчетном примере.

Расчетный пример

Дано.

Техническое состояние объекта инженерной системы уникального здания может быть определено с помощью двух различных измерительных методик. При использовании каждой методики применяются по три средства контроля. Критерием выбора методики является достижение максимальной оперативности контроля.

Для каждого из средств контроля, входящих в состав рассматриваемых измерительных методик, известны нечеткие экспертные оценки частных показателей эффективности (оперативности контроля). Эти нечеткие показатели рассматриваются как лингвистические переменные, имеющие по три терм-множества. Каждый терм имеет функцию принадлежности колоколообразной формы. Имеются также экспертные базы знаний, характеризующие влияние каждого из средств контроля на конечный результат, – определение технического состояния объекта по заданному показателю эффективности.

Исходные данные для одной измерительной методики и для используемого показателя эффективности контроля (оперативности) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные по функции принадлежности (ФП) термов

Название терма	**Обозначение терма**	**Параметры ФП терма**		**Максимально разрешенное значение показателя**
		b	**c**	
Измерительная методика 1				
Средство контроля 1				
Малый уровень оперативности	МУО	4,000	1,000	3,000
Средний уровень оперативности	СУО	2,000	1,500	
Высокий уровень оперативности	ВУО	1,000	1,200	
Средство контроля 2				
Малый уровень оперативности	МУО	12,000	1,600	4,000
Средний уровень оперативности	СУО	9,000	1,400	
Высокий уровень оперативности	ВУО	3,000	1,200	
Средство контроля 3				
Малый уровень оперативности	МУО	18,000	3,5000	11,000
Средний уровень оперативности	СУО	12,000	4,000	
Высокий уровень оперативности	ВУО	8,000	3,000	

Экспертная база знаний для функции принадлежности измерительной методики 1 рассматриваемого объекта здания представлена в таблице 2.

Таблица 2. База знаний для измерительной методики 1 для объекта 1

№ п/п	Терм средства 1	Терм средства 2	Терм средства 3	Значение терма лингвистической переменной «показатель оперативности контроля для методики 1»
1	МУО	МУО	МУО	Малый уровень оперативности
2	МУО	СУО	МУО	
3	СУО	МУО	МУО	
4	МУО	МУО	СУО	
5	СУО	СУО	СУО	Средний уровень оперативности
6	МУО	СУО	СУО	
7	СУО	МУО	СУО	
8	ВУО	ВУО	ВУО	Высокий уровень оперативности
9	ВУО	ВУО	СУО	
10	СУО	ВУО	ВУО	

Аналогичным образом представляются исходные данные по измерительной методике 2.

Необходимо: определить, какая методика в наибольшей мере эффективна для контроля технического состояния каждого из рассматриваемых объектов по критерию максимальной оперативности.

Решение задачи.

В соответствии с заданными исходными данными выполним расчет значений функций принадлежности для каждого из средств контроля, используемых в методике 1. Вид функций принадлежности для термов частного показателя оперативности средства контроля 1 представлен на рисунке 5.

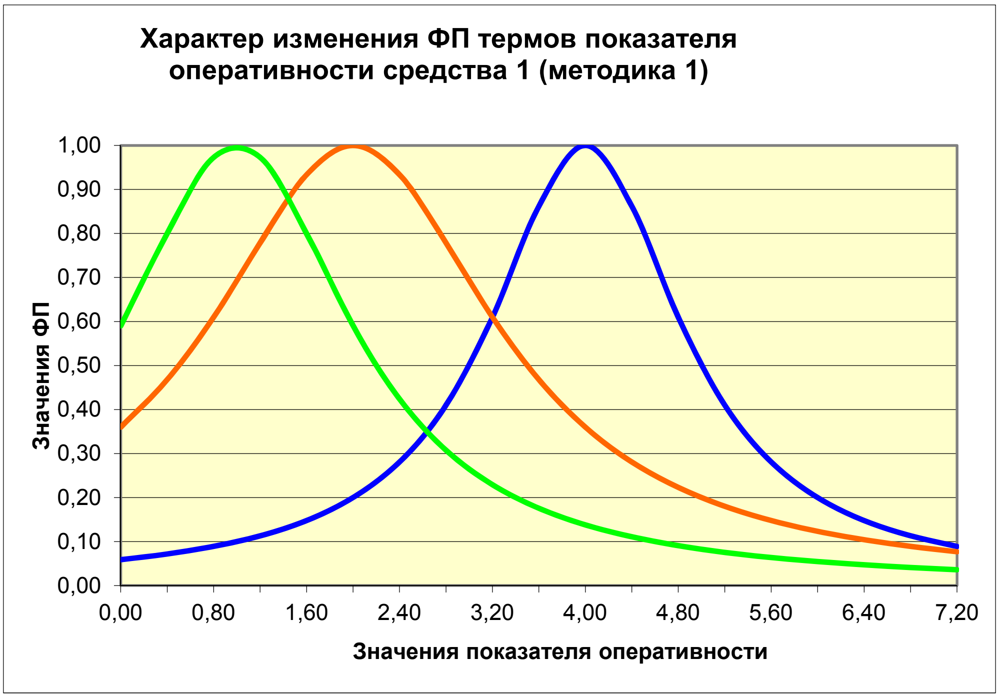


Рисунок 5. Расчетные значения ФП термов показателя оперативности средства 1 измерительной методики 1

Аналогичные расчеты выполняются для функций принадлежности термов других средств контроля, используемых в составе методики 1. Теперь необходимо определить значения функций принадлежности термов частных показателей оперативности для каждого из средств. При этом будем использовать предельно допустимые для них значения данного показателя (числовые данные правого столбца таблицы 1). Результаты расчетов для средств измерительной методики 1 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные значения функций принадлежности термов частных показателей оперативности контроля

Название терма	Обозначение терма	Значение ФП терма
Средство контроля 1		
Малый уровень оперативности	МУО	0,500
Средний уровень оперативности	СУО	0,692
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,265
Средство контроля 2		
Малый уровень оперативности	МУО	0,038
Средний уровень оперативности	СУО	0,073
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,590
Средство контроля 3		
Малый уровень оперативности	МУО	0,200
Средний уровень оперативности	СУО	0,941
Высокий уровень оперативности	ВУО	0,500

Расчетные значения для функций принадлежности базы знаний с учетом данных таблицы 3 приведены в таблице 4.

Таблица 4. Численные показатели для базы знаний частных показателей оперативности контроля объекта

№ п/п	методика 1 средство 1	методика 1 средство 2	методика 1 средство 3	Значение терма лингвистической переменной "показатель оперативности контроля для методики 1"	Значение ФП для терма показателя оперативности
1	0,500	0,038	0,200	0,038	0,07
2	0,500	0,073	0,200	0,073	
3	0,692	0,038	0,200	0,038	
4	0,500	0,038	0,073	0,038	
5	0,692	0,073	0,941	0,073	0,07
6	0,500	0,073	0,941	0,073	
7	0,692	0,038	0,941	0,038	
8	0,265	0,590	0,500	0,265	0,50
9	0,265	0,590	0,941	0,265	
10	0,692	0,590	0,500	0,500	

Из результатов таблицы 4 следует, что для измерительной методики 1 наиболее возможен результат «высокий уровень оперативности» при значении функции принадлежности для этого терма, равном 0,50. Пусть для второй измерительной методики аналогичным образом получаем терм-результат «средний уровень оперативности», для которого значение функции принадлежности равно 0,43. В соответствии с правилами нечеткой логики более предпочтительной для выбора является измерительная методика 1. В этом случае в состав приборной базы пункта мониторинга должны входить средства контроля технического состояния рассматриваемого объекта инженерной системы, которые необходимы для реализации измерительной методики 1.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

На основе доступных, хотя и ограниченных сведений о парке анализируемых средств контроля возможно построение модели знаний в форме продукционных правил нечеткого вывода интегральных показателей эффективности измерительных методик приборной базы пункта мониторинга инженерных систем уникального здания. Исходными данными для базы знаний выступают частные показатели эффективности средств контроля, используемые в составе анализируемых измерительных методик. Это позволяет дополнить имеющиеся объективные данные нечеткой информацией, отражающей знания и опыт экспертов в исследуемой предметной области. Такой подход позволяет существенно сократить объем дорогостоящих натурных испытаний для определения состава приборной базы пунктов мониторинга.

Полученные результаты имеют ясный физический смысл и численную меру. Это позволяет обоснованно выбрать рациональную методику измерений и соответствующий ей состав измерительных приборов для контроля технического состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

Заключение

1. Для формирования состава средств пункта мониторинга состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений наиболее применимо принятие решения на основе сравнения интегральной эффективности измерительных методик по заданным критериям (оперативности, стоимости, результативности контроля).

2. Малочисленность или уникальность проектов рассматриваемых зданий (сооружений) приводит к выводу о нецелесообразности проведения натурных экспериментов в объеме, позволяющем использование методов статистического анализа их результатов для определения состава приборной базы пунктов мониторинга, по причине высоких затрат времени и финансов.

3. Приемлемым подходом для решения задачи обоснования рационального состава средств измерений в пункте мониторинга является применение модели знаний в форме продукционных правил нечеткого вывода об интегральной эффективности измерительных методик для определения технического состояния объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений на основе экспертных заключений о частных показателях эффективности указанных средств измерений.

4. Рациональность варианта приборной базы пункта мониторинга оценивается по нескольким критериям. Для принятия итогового решения сравниваются полученные расчетные значения функций принадлежности интегральной эффективности измерительной методики по каждому критерию. Это существенно упрощает процедуру получения конечного результата по нескольким критериям эффективности целевого применения пункта мониторинга объектов инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

5. Рассмотренный подход к структурно-функциональному анализу пунктов мониторинга может найти практическое применение в деятельности компаний, осуществляющих мониторинг инженерных систем уникальных зданий и сооружений.

Литература

1. Положение об организации, проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания жилых зданий, объектов коммунального хозяйства и социально-культурного назначения (ВСН 58-88(р)). Приказ Госкомархитектуры Госстроя СССР №312 от 23.11.1988 г. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
2. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений
3. Методические рекомендации по определению технического состояния систем коммунальной инфраструктуры. Рекомендательное письмо Министерства регионального развития Российской Федерации от 26 апреля 2012 г. № 9905-АП/14.
4. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
5. Ватин Н.И., Улыбин А.В., Огородник В.М. ГОСТ Р 53778-2010: обследование инженерных сетей и другие особенности нового нормативного документа // Инженерно-строительный журнал. 2011. №1. С. 5–7.
6. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник / Под ред. В.Д. Дмитриева, Б.Г. Мишукова. Л.: Стройиздат, Ленигр. отд-ние, 1988. 338 с.
7. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интегрированная система морфологического анализа и синтеза концептуальных технических решений: монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2004. 220 с.
8. Батоврин В.К., Левин М.Ш. Использование метода морфологического проектирования в открытых информационных системах // Информационные технологии и вычислительные системы. 2005. №4. С. 47–54.

9. Костерин В.В., Оптимизация технических систем и устройств: Учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 1996. 187 с.
10. Levin M.Sh. Towards Combinatorial Analysis, Adaptation, and Planning of Human-Computer Systems // Applied Intelligence, 2002. Vol.16(3). Pp. 235–247.
11. Хубка В. Теория технических систем: Пер. с нем.. М.: Мир, 1987. 208 с.
12. Sgarbas K., Fakotakis N., Kokkinakis G. A Straightforward Approach to Morphological Analysis and Synthesis // Proc. COMLEX 2000, Workshop on Computational Lexicography and Multimedia Dictionaries, Kato Achaia, Greece, September 22-23, 2000. Pp. 31-34.
13. Солдатенко Т.Н. Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности // Инженерно-строительный журнал. 2011. №5(23). С. 60–66.
14. Merenkov A., Sennova E., Sumarokov S. Optimization of development of heat and water supply system // Sov. Techn. Rev. A, Energy. New York: Harwood Academic Publ. GmbH, 1994. Vol. 6.1. Part 4. Pp. 1–31.
15. Liu K.F.R. A Possibilistic Petri Net Model for Diagnosing Cracks in RC Structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2003. Vol. 18. Issue 6. Pp. 426–439.
16. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O., Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings // In: Advances in Computational Intelligence and Learning, Methods and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. Pp. 401–412.
17. Адаменко А.Н. Системы искусственного интеллекта: Учебное пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 291 с.
18. Солдатенко Т.Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 52–61.
19. Резервуары вертикальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности (Методические указания) / Российская ассоциация экспертных организаций техногенных объектов повышенной опасности «Росэкспертиза», «Научно-промышленный союз «РИСКОМ», НПК «Изотермик». М., 2009. 288 с.
20. Коновалов Н.Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. 111 с.
21. Жуков Б.Н., Карпик А.П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов: Учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2006. 148 с.
22. Надежность и эффективность в технике: Справочник Т. 10: Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности / Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.
23. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
24. Асаи К., Ватада Д., Иван С. [и др.]. Прикладные нечеткие системы: Пер. с япон. М.: Мир, 1993. 368 с.
25. Панкевич О.Д., Штовба С.Д. Діагностування тріщин будівельних констркцій за допомогою нечітких баз знань. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. 108 с.
26. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 166 с.
27. Wang L.X., Mendel J.M., Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1992. Vol. 22. No. 6. Pp. 1414–1427.

Владимир Стальевич Солдатенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)925-68-41; эл. почта: soldatenko_vs@mail.ru

Виталий Николаевич Харин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(911)219-25-32; эл. почта: kh.vet@rambler.ru

Методика расчета и оптимизации работы систем подачи и распределения воды с водозаборными скважинами

Аспирант О. Ю. Поберезниченко;
к.т.н., старший научный сотрудник Т.П. Хомутецкая,
Институт водных проблем и мелиорации

Аннотация. В статье предложена методика выполнения гидравлических и технико-экономических расчетов водопроводных систем с водозаборными скважинами, позволяющая находить оптимальный состав сооружений системы и самые эффективные режимы их совместной работы во время эксплуатации.

Одними из наиболее сложных для гидравлических и технико-экономических расчетов являются системы подачи и распределения воды, в комплекс которых входят водозаборные скважины с погружными центробежными насосами. При проектировании новых, наладке построенных и реконструкции действующих систем необходимо решать задачи выбора оптимального состава сооружений, экономичных их размеров и наиболее выгодного режима совместной работы.

В настоящее время при заборе подземных вод такие системы являются наиболее распространенными, а сложность оптимизационных расчетов совместной работы входящих в них взаимодействующих сооружений заключается в необходимости определения характеристик всех скважин, их взаимного влияния друг на друга, а также изменения характеристик во время эксплуатации.

Ключевые слова: система подачи и распределения воды; ресурсосохранение; гидравлическое сопротивление; потери напора; удельный расход электроэнергии

Введение

Известно, что стоимость потребляемой электроэнергии является одной из главных составляющих, формирующих себестоимость воды на водопроводных станциях, поэтому меры, направленные на снижение энергопотребления при обеспечении расчетных значений напора и подачи воды, очень актуальны в условиях увеличения тарифов на электроэнергию в настоящее время [1].

Сегодня вычислительная техника позволяет выполнять гидравлические и технико-экономические расчеты современных гидросистем любой сложности и с высокой степенью точности. Существует большое количество методов расчетов. Однако точность расчетов зависит от достоверности исходных данных, которым, к сожалению, уделяется недостаточное внимание. А это во многих случаях приводит к возникновению противоречий между проектированием и реальными условиями эксплуатации и в конечном итоге к необеспечению потребителей водой в заданном количестве под необходимым напором и перерасходованию средств [2]. Недостаточная эффективность работы действующих систем подачи и распределения воды (СПРВ) является одной из основных причин отсутствия воды у потребителей, несмотря на большие капиталовложения, затрачиваемые на реконструкцию этих систем. Более того, имеются случаи, когда такая реконструкция приводила к ухудшению водоснабжения в отдельных районах города [3].

Поэтому важна разработка методов расчета реконструируемых СПРВ и выбора оптимального режима работы водопроводных сооружений, эти методы освещены в литературе недостаточно.

При решении таких задач в расчетах математических моделей следует учитывать реальные характеристики всех сооружений и прогнозировать их изменение в процессе эксплуатации системы [4].

Обзор литературы

Вопросы оптимизации СПРВ, а также технико-экономические расчеты водоводов и водопроводных сетей уже давно изучаются учеными разных стран [5].

Первые работы по технико-экономическому расчету водопроводных сетей были опубликованы А.А. Суриным (1927 г.) и Н.Н. Гениевым (1928 г.). В работе А.М. Занфирова (1933 г.) постановка задачи была существенно расширена. В ней учитывались не только влияние разветвленности, но и нелинейность зависимости стоимости труб от ее диаметра. Дальнейшее совершенствование метода технико-экономического расчета теплофикационной трубопроводной системы было дано в работах Б.Л. Шифринсона (1940 г.) [6].

Наиболее обобщенный метод экономического расчета кольцевых водопроводных сетей дан В.Г. Лобачевым (1938–1950 гг.). Далее появились работы М.В. Кирсанова (1949 г.), Д.М. Минца (1951 г.), А.В. Теплова (1946–1950 гг.), В.П. Сироткина (1951 г.) и ряда других исследователей. Заслуживают внимания работы Л.Н. Диасамидзе, М.А. Мосткова, Г.Г. Сванидзе, В.С. Дикаревского и др. [2].

Усовершенствованный метод технико-экономического расчета разветвленных и кольцевых водопроводных сетей разработал Л.Ф. Мошнин (1940–1950 гг.) [6].

В 1970–1980 гг. значительное внимание уделяется вопросам исследования и анализа работы действующих СПРВ с целью интенсификации их работы и реконструкции, результаты этих исследований получили широкое распространение [7–16].

Значительный вклад в научные разработки в области исследования систем подачи и распределения воды внес российский ученый Н.Н. Абрамов (1960–1980 гг.) [17–19] и украинский ученый П.Д. Хоружий [2, 20, 21, 22, 23].

В Украине в настоящее время над этой тематикой работают ученые Института водных проблем и мелиорации НААН.

Постановка задачи

Основные требования к действующим СПРВ – это надежность и бесперебойность обеспечения водой всех потребителей в заданном количестве и под требуемым напором при наименьших приведенных затратах. Однако эти требования могут не выполняться вследствие непрерывного роста водопотребления и изменения (в худшую сторону) характеристик водопроводных систем [24].

СПРВ являются динамичными системами, в которых происходит непрерывное изменение как размеров и режимов водопотребления, так и характеристик входящих в них сооружений, что зачастую приводит к неудовлетворению требований отдельных водопотребителей. Принимаемые меры по исправлению создавшегося положения не всегда рациональны и экономичны, часто приводят к перерасходу строительных и эксплуатационных ресурсов [25].

СПРВ включают в себя насосные станции, водоводы, водопроводную сеть с расположенными на ней напорно-регулирующими сооружениями. Это наиболее сложная и дорогостоящая часть современных городских водопроводов. Стоимость таких систем достигает 80% общей стоимости водопровода, а выбор оптимальных размеров сооружений и наиболее эффективных режимов их совместной работы вызывает наибольшие трудности [26].

Описание методики

Для оптимизации совместной работы сооружений в СПРВ разработана методика расчетов, согласно которой подачу воды из каждой (i-й) скважины можно определить по формуле:

$$Q_i = P_i \left[\frac{-1/q_i + \sqrt{(1/q_i)^2 + 4(H_{ф.i} - H_{г.i} - \Sigma h_i)(S_{k.i} + S_{в.i} + S_{ф.i})}}{2(S_{k.i} + S_{в.i} + S_{ф.i})} \right], \text{ л/с,} \qquad (1)$$

где P_i – параметр, указывающий, работает ли эта скважина (P_i = 1) в настоящее время в расчетной системе водоснабжения или она отключена (P_i = 0); q_i – удельный дебит скважины, л/(с·м); $H_{ф.i}$ и $S_{ф.i}$ – параметры гидравлической характеристики Q-H насоса, установленного в данной скважине, соответственно, м и (с/л)^{2}м; $H_{г.i}$ – геометрическая высота водоподъема от статического уровня воды в скважине $Z_{cm.i}$ до расчетного уровня воды в резервуаре Z_p (рис. 1), м; $S_{к.i}$ и $S_{в.i}$ – гидравлические сопротивления в коммуникациях насосной установки и в соединительном трубопроводе от скважины до точки подключения к совместному водоводу, (с/л)^{2}м; Σh_i – сумма потерь напора на общих участках водовода в схеме движения воды к сборному резервуару, м.

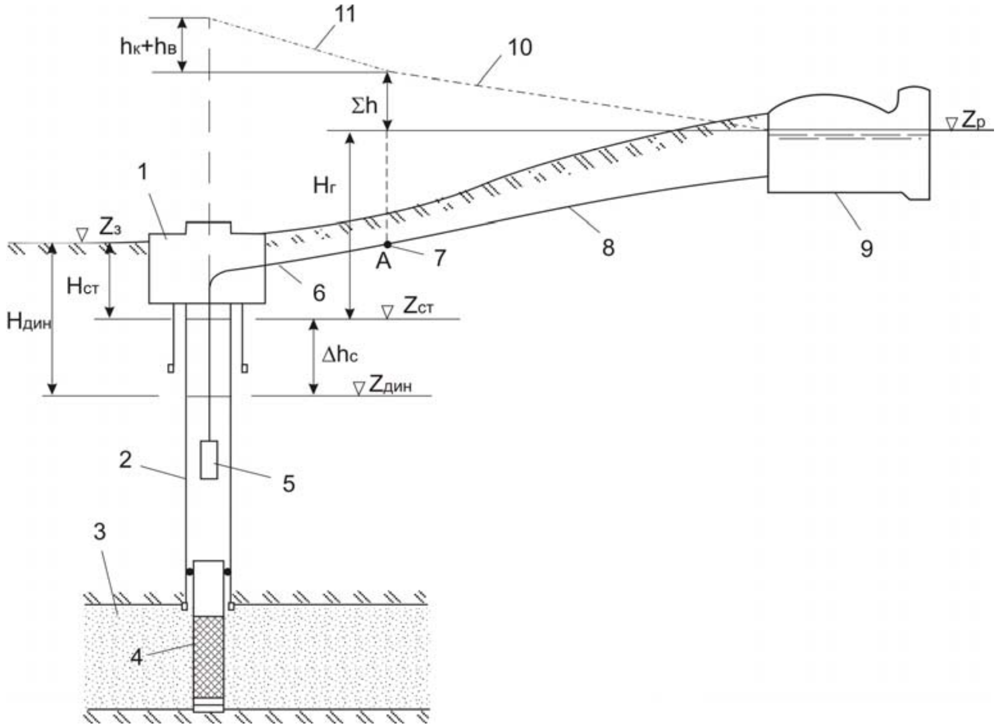


Рисунок 1. Расчетная схема подачи воды из скважины в резервуар [20]:
1 – оголовок; 2 – эксплуатационная обсадная колонна; 3 – водоносный пласт; 4 – фильтр; 5 – насосный агрегат; 6 – соединительный трубопровод от скважины к водоводу; 7 – точка подключения скважины к совместному водоводу; 8 – совместный водовод; 9 – резервуар; 10 – пьезометрическая линия в водоводе; 11 – пьезометрическая линия в соединительном трубопроводе и коммуникациях насосной установки

Для расчетов необходимы следующие исходные данные [27]:

- расчетная отметка уровня воды в резервуаре Z_p;
- отметки поверхности земли у скважин $Z_{з.i}$;
- глубина статического $H_{cm.i}$ и динамического $H_{дин.i}$ уровней воды каждой из скважин;
- подача воды из скважин $Q_{п.i}$ по паспортным или опытным данным;
- удельное гидравлическое сопротивление трубопроводов (в зависимости от материала и диаметра) на пути от каждой скважины до общего водовода $A_{t.i}$ и на общих участках транспортировки воды к РЧВ $A_{t.сп.j}$;
- длина трубопроводов от каждой скважины до общего водовода L_i и длина всех участков общего водовода $L_{сп.j}$;
- марки установленных в скважинах насосов и соответствующие им значения параметров гидравлических ($H_{ф.i}$ и $S_{ф.i}$) и энергетических (A_i, B_i и α_i) характеристик.

Значение $S_к$ из формулы (1) учитывает гидравлическое сопротивление движению воды в щели между электродвигателем погружного насоса и эксплуатационной обсадной колонной, а также в водоподъемной трубе скважины и местные гидравлические сопротивления в ней:

$$S_k = \frac{h_{щ}}{Q_н^{\ 2}} + 1{,}1 A_m \cdot \ell \text{ , (с/л)}^2\text{м,} \qquad (2)$$

где $h_щ$ – потери напора в щели между электродвигателем погружного насоса и эксплуатационной обсадной колонной, м; A_m и ℓ – соответственно удельное сопротивление, (с/л)^2, и длина водоподъемных труб в скважине, м; 1,1 – коэффициент, учитывающий местные сопротивления в водоподъемных трубах; $Q_н$ – расчетный расход воды насосом, л/с.

$$h_щ = \frac{0{,}04 l_e + 0{,}3(D_к - D_e)}{12{,}1(D_к + D_e)^2 (D_к - D_e)^3} Q_c^2, \quad \text{м}, \tag{3}$$

где l_e – длина электродвигателя, м; $D_к$ – внутренний диаметр эксплуатационной обсадной колонны скважины, м; D_e – диаметр электродвигателя, м; Q_c – расход воды, забираемой из скважины, м^3/с.

Ориентировочно гидравлическое сопротивление $S_к$ можно определить как [28]

$$S_k = \frac{h_к}{Q_н^{\ 2}}, \ (\text{с/л})^2\text{м}, \tag{4}$$

где $h_к$ – потери напора в коммуникациях насосной установки ($h_к \approx 2–4$ м).

Гидравлическое сопротивление соединительного трубопровода от скважины до точки подключения к совместному водоводу (точка А, рис. 1) определяют по формуле

$$S_в = A_t \cdot L, \qquad (\text{с/л})^2\text{м}, \tag{5}$$

где A_t – удельное гидравлическое сопротивление трубопровода, (с/л)^2, которое принимают в зависимости от материала, диаметра и срока эксплуатации труб; L – длина трубопровода, м.

Отметки статического $Z_{ст.i}$ и динамического $Z_{дин.i}$ уровней воды определяют по результатам экспериментальных исследований скважин [29]:

$$Z_{ст.i} = Z_{з.i} - H_{ст.i}, \quad \text{м}; \tag{6}$$

$$Z_{дин.i} = Z_{з.i} - H_{дин.i}, \quad \text{м}, \tag{7}$$

где $Z_{з.i}$ – отметка поверхности земли у скважины, м; $H_{ст.i}$ и $H_{дин.i}$ – соответственно глубина статического и динамического уровней, м.

Геометрическую высоту водоподъема находят как разность между расчетным уровнем воды в резервуаре $Z_р$ и статическим уровнем воды в скважине $Z_{ст.i}$:

$$H_{г.i} = Z_р - Z_{ст.i}, \ \text{м}. \tag{8}$$

Удельный дебит скважины определяют по формуле

$$q_i = \frac{Q_i}{\Delta h_{c.i}}, \ \text{л/с·м}, \tag{9}$$

где $\Delta h_{c.i}$ – снижение статического уровня воды в скважине при откачке из нее расхода воды Q_i:

$$\Delta h_{c.i} = Z_{ст.i} - Z_{дин.i}, \ \text{м}. \tag{10}$$

Параметры $H_ф$ и $S_ф$ из формулы (1) определяют, используя зависимости [20]:

$$H_ф = H_1 + S_ф Q_1^2 = H_2 + S_ф Q_2^2; \tag{11}$$

$$S_ф = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^{\ 2} - Q_1^{\ 2}}, \tag{12}$$

где H_1 и H_2 – напоры насоса при подаче им расходов воды соответственно Q_1 и Q_2, которые принимают из характеристики Q-H насоса в зоне его рекомендованного применения (в зоне наивысшего КПД).

Поскольку в формуле (1) величина Σh_i зависит от расхода воды из других скважин, который перед расчетами неизвестен, то задача по определению расхода воды Q_i является неопределенной, и ее можно решить только путем итераций. Целесообразно при этом использовать современное программное обеспечение персональных компьютеров, которое позволяет быстро и с высокой точностью производить подобные вычисления [30].

Для первого приближения принимают значения предварительно намеченных расходов воды со всех скважин системы в соответствии с паспортными или опытными данными установленных в них насосов. Это дает возможность определить суммарные потери напора на общих участках водовода по пути движения воды к резервуару и за формулой (1) находить новые значения подачи воды со скважин. Расчеты ведут до выполнения для каждой скважины условия

$$\left|Q_i - Q_i'\right| \leq \Delta Q, \tag{13}$$

где Q_i и Q_i' – новое и предыдущее значения расхода воды из данной (i-й) скважины; ΔQ – допустимое расхождение в значениях расхода воды.

Если условие (13) не выполняется, то расчеты продолжают, принимая в последующих приближениях для каждой из скважин водопроводной системы средние значения расхода воды:

$$Q_i'' = \frac{Q_i + Q_i'}{2}. \tag{14}$$

Оптимальным будет такой режим работы водозаборных скважин, при котором будет обеспечена подача расчетного расхода воды в резервуар при наименьшем потреблении электроэнергии.

Удельный расход электроэнергии на подачу 1 м^3 воды из одной скважины в резервуар определяют по формуле

$$E_i = \frac{N_i}{Q_i}, \text{ кВт.ч/м}^3, \tag{15}$$

где Q_i – подача насоса, м^3/ч; N_i – потребляемая на валу насоса мощность, которую можно определить, используя зависимость [2]

$$N_i = A + BQ_i^{\alpha}, \text{ кВт}, \tag{16}$$

где A, B и α – параметры энергетической характеристики насоса, установленного в данной скважине

$$A = \frac{N_1 N_t - N_{cp}^{\ 2}}{N_1 + N_t - 2N_{cp}}, \tag{17}$$

где N_{cp} – потребляемая мощность на валу насоса при подаче им воды расходом

$$Q_{cp} = \sqrt{Q_1 Q_t}, \tag{18}$$

где t – число значений Q_i и соответствующих им N_i.

Параметры B и α находят как корни системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} & t\ln B + \alpha\sum \ln Q_i = \sum \ln(N_i - A); \\ & \ln B\sum \ln Q_i + \alpha\sum (\ln Q_i)^2 = \sum \ln Q_i \ln(N_i - A) \end{aligned}\right\}. \tag{19}$$

Средний удельный расход электроэнергии всеми скважинами при расчетной схеме подачи из них воды определяют как

$$E_{cp} = \frac{\Sigma N_i}{\Sigma Q_i}, \text{ кВт·ч/м}^3. \tag{20}$$

Таким образом, математическое моделирование работы гидравлически взаимосвязанных сооружений в системе подачи и распределения воды, включающей скважины, насосы, трубопроводы, совместные водоводы и водосборные резервуары, дает возможность определять подачу воды и потребляемую на валу насоса мощность как каждой отдельной скважины, так и всей водопроводной системы в целом [31, 32].

Заключение

1. Данная методика позволяет производить расчеты как вновь проектируемой системы водоснабжения, так и уже эксплуатируемой. Следует отметить, что точность полученных результатов расчета зависит от точности введения исходных данных, поэтому при оптимизации работы действующей водопроводной системы необходимо учитывать изменение характеристик сооружений в процессе их эксплуатации (гидравлических сопротивлений $S_к$ и $S_в$, характеристик насосов, а значит параметров $H_ф$, $S_ф$, A, B и α, уровней воды и т. д.).

2. Пользуясь изложенной методикой расчета совместной работы сооружений, можно анализировать работу системы при любых возможных условиях (отключение из работы одной или нескольких скважин, замена насосов, трубопроводов и т. п.) и выбирать наиболее выгодный вариант, при котором будет наименьшим удельный расход электроэнергии.

3. Кроме того, в условиях наблюдаемого снижения водопотребления и появления значительного резерва водозаборных и регулирующих сооружений на действующих водопроводах можно использовать предложенную методику расчетов и определять оптимальные режимы работы системы водоснабжения с учетом различной стоимости электроэнергии в дневное и ночное время суток при использовании многозонных тарифов.

Литература

1. Alexander S.M., Glenn N.L., Bird D.W. Advanced techniques in the mathematical modeling of water-distribution systems // Journal – American Water Works Association. 1975. Vol. 67. No.7. Pp. 20–26.
2. Хоружий П.Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1983. 152 с.
3. Ramezani Etedali H., Liaghat A., Parsinejad M., Tavakkoli A.R., Bozord Haddad O., Ramezani Etedali M. Water allocation optimization for supplementary irrigation in rainfed lands to increase total income case study: upstream Kerkheh River basin // Irrigation and Drainage. 2013. Vol. 62. No.1. P. 74–83.
4. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // Building Services Engineer. 1978. Vol. 45. No. 10. Pp. 18–24.
5. Clark R.M. Water supply economics // Journal of the Urban Planning and Development Division. 1976. Vol. 102. No. 1. Pp. 213–224.
6. Robino P., Stellacci A.M., Rana R.M., Catalano M., Caliandro A. A Non-Linear model for optimal allocation of irrigation water and land under adequate and limited water supplies: a case study in Southern Italy // Irrigation and Drainage. 2013. Vol. 62. No. 2. Pp. 145–155.
7. .Choi J.-D, Lim K.-J., Won C.H. Catchment water quality management planning for sustainable development of Tidal Areas // Irrigation and drainage. 2013. Vol. 62. Supplement S1. Pp. 18–23.
8. Кикачейшвили Г.Е. Методология оптимизации систем подачи и распределения воды. Тбилиси: Технический университет, 2002. 180 с.
9. Карамбиров С.Н. Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации: Автореф. дисс….докт. техн. наук. Москва, 2005. 46 с.
10. Кожинов И.В., Колесов В.В., Майзельс М.П., Эгильский И.С. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды. М.: Строиздат, 1978. 112 с.
11. Митянин В.М. Повышение эффективности работы системы транспортирования воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1980. №2. С. 27.
12. Bhave P.R. Noncomputer optimization of single-source networks // Journal of the Environmental Engineering Division. 1978. Vol. 104. No. 4. Pp. 799–814.
13. Cenedese A., Mele P. Optimal design of water distribution networks // Journal of the Hydraulics Division. 1978. Vol. 104. No. 2. Pp. 237–247.
14. Collins A.G., Jonson R.L. Finite – element method for water-distribution networks // Journal – American Water Works Assosiation. 1975. Vol. 67. No. 7. Pp. 12–16.
15. Рекомендации по сокращению потерь воды в жилищном хозяйстве. М.: ОНТИ АКХ, 1977. 27 с.

16. Эгильский И.С. Кожинов И.В. Основные направления интенсификации работы городских систем подачи и распределения воды // Интенсификация и оптимизация городских и промышленных водопроводов. Материалы семинара. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1973. С. 3–9.

17. Абрамов Н.Н. Водоснабжение: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.

18. Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др. Расчет водопроводных сетей: Учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 278 с.

19. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат., 1972. 288 с.

20. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Киев: Аграрна наука, 2008. 534 с.

21. Хоружий П.Д., Худоба П.Ф., Трошкин А.М., Батрак П.И., Патий В.В. Больше воды – меньшими затратами // Городское хозяйство Украины. 1983. №1(82). С. 15.

22. Хомутецька Т.П. Методика розрахунку автоматизованих систем подачі води із шахтних колодязів // Меліорація і водне господарство. Випуск 99. Киев: Аграрна наука, 2011. С. 200–214.

23. Белан А.Е., Хоружий П.Д. Проектирование и расчет устройств водоснабжения. Киев: Будівельник, 1981. 312 с.

24. Рекомендации по инженерному оборудованию сельских населенных пунктов. Ч.2. Водоснабжение / ЦНИИЭП инженерного оборудования. М: Стройиздат, 1984. 80 с.

25. Оводов В.С. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение. М.: Колос, 1984. 480 с.

26. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение. М.: Стройиздат, 1995. 688 с.

27. Журба М.Г. Сельскохозяйственное водоснабжение. Кишинев: Universitas, 1991. 284 с.

28. Супрун А.Н., Найденко В.В. Вычислительная математика для инженеров-экологов: Методическое пособие. М.: АСВ, 1996. 391 с.

29. Сомов М. А., Журба М. Г. Водоснабжение. В 2 т. Т. 1. Системы забора, подачи и распределения воды. М.: Изд-во АСВ, 2008. Pp. 210–220.

30. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий: Справочник проектировщика / Под ред. И.А. Назарова. М.: Стройиздат, 1976. 248 с.

31. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1973. 113 с.

32. Державні будівельні норми України: ДБН.В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Введ. 01.03.13, 2013. 181 с.

Ольга Юрьевна Поберезниченко, г.Киев, Украина
+38(097)9264877; эл. почта: olia-olenia@ukr.net

Татьяна Петровна Хомутецкая, г.Киев, Украина
+38(063)0520291; эл. почта: itsk@bigmir.net

Требования к материалам, представляемым к публикации

Материалы принимаются только через систему электронной редакции журналов СПбГПУ. Авторам необходимо зарегистрироваться в системе (http://journals.spbstu.ru/) и подать статью через нее, предварительно ознакомившись с нижеприведенными требованиями и условиями опубликования. Публикация в журнале бесплатна для авторов.

Этические нормы и авторские права

Подавая статью в журнал, автор соглашается на условия лицензионного договора, в частности, на то, что все статьи без исключения публикуются в открытом доступе на сайте журнала и в Научной электронной библиотеке России. Также автор подтверждает, что статья является оригинальной, ранее не опубликованной, содержит только проверенные и точные данные; любые данные, полученные не автором, имеют соответствующие ссылки на источник.

Тематика статей

В «Инженерно-строительном журнале» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, по тематике «Строительство». Статьи принимаются в тот или иной номер в соответствии с тематикой на текущее полугодие.

№	Дата выхода	Срок подачи материалов	Тема номера
3(47)	05.05.2014	24.03.2014	Технология и организация строительства. Строительные материалы и изделия
4(48)	27.06.2014	12.05.2014	Основания и фундаменты. Подземные сооружения. Гидротехническое строительство
5(49)	22.08.2014	14.07.2014	Строительные конструкции. Строительная механика
6(50)	10.10.2014	01.09.2014	Теплогазоснабжение и вентиляция. Водоснабжение и канализация. Гидравлика.

Структура и содержание статей

Обязательны следующие элементы статьи: введение, включающее обзор иностранной и отечественной литературы и постановку задачи; основная часть (описание исследования); заключение, включающее нумерованные выводы; список литературы; источник финансирования (если есть).

Технические требования к статьям

Статьи подаются в формате docx (MS Word 2007-2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Все эти поля заполняются отдельно при подаче через электронную редакцию.

Рекомендуемый объем статей: от 15000 до 30000 знаков с пробелами. Таблицы выполняются средствами Word (не рисунками) и располагаются внутри текста статьи. Иллюстрации должны быть представлены в отдельных графических файлах (один рисунок – один файл). Допустимые форматы: JPEG, TIFF, BMP. В текстовый файл иллюстрации можно вставить для обозначения рекомендуемого места их использования.

Список литературы на русском языке должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания. Порядковый номер в тексте заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. Также к статье прилагается список литературы на латинице, оформленный в соответствии с инструкцией по транслитерации списка литературы, размещенной на сайте издания.

Аннотация к статье

В журнал подается расширенная аннотация на двух языках: русском и английском. Особое внимание следует уделить аннотации на английском языке (если статья на русском). Аннотация должна повторять структуру статьи: актуальность, цель, методика, результаты, выводы. Аннотация должна содержать от 100 до 250 слов.

Подробные требования к статьям см. на сайте журнала:
http://www.engstroy.spb.ru/autors.html

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Инженерно-строительный институт
Курсы повышения квалификации и профессиональной переподготовки
195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,
тел/факс: 552-94-60, www.stroikursi.spbstu.ru,
stroikursi@mail.ru

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,
не имеющих базового профильного высшего образования
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)
по направлению «Строительство» по программам:

П-01 «Промышленное и гражданское строительство»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Основы проектирования зданий и сооружений***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика***

П-02 «Экономика и управление в строительстве»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Экономика и ценообразование в строительстве***
- ***Управление строительной организацией***
- ***Организация, управление и планирование в строительстве***
- ***Автоматизация сметного дела в строительстве***

П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы механики жидкости и газа***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения***
- ***Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения***
- ***Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD***
- ***Электроснабжение и электрооборудование объектов***

П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем***
- ***Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD***
- ***Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office***

П-05 «Контроль качества строительства»

Программа включает учебные разделы:

- ***Основы строительного дела***
- ***Инженерное оборудование зданий и сооружений***
- ***Технология и контроль качества строительства***
- ***Проектирование и расчет железобетонных конструкций***
- ***Проектирование и расчет металлических конструкций***
- ***Обследование строительных конструкций зданий и сооружений***
- ***Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика***

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке установленного образца, дающий право на ведение профессиональной деятельности