

УДК 621.643.001:536.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЕПЛА

Половников В.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект № МК-1284.2011.8)

АННОТАЦИЯ

Проведено численное исследование теплопереноса в зонах прокладки подземных теплотрасс с использованием сопряженной кондуктивно-конвективно-радиационной модели теплопереноса. Установлены масштабы влияния теплообмена излучением в полости канала теплопровода на тепловые потери и целесоо-

бразность применения предложенного подхода при моделировании тепловых режимов работы тепловых сетей. Показано, что действующая методика расчета подземных теплотрасс дает наиболее корректные значения тепловых потерь при прокладке тепловых сетей в грунтах, имеющих достаточно высокую теплопроводность.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшее направление энергосбережения в области теплоснабжения в современных условиях – это сокращение технологических потерь при передаче тепловой энергии потребителям [1]. При этом одним из ключевых условий, без которого не может быть достигнут необходимый результат, является оптимизация эксплуатационных режимов функционирования тепловых сетей [1].

В настоящее время проектирование тепловой защиты и анализ тепловых режимов работы тепловых сетей основаны на применении общих балансовых соотношений [2], не учитывающих многих факторов и процессов, влияющих на условия эксплуатации и взаимодействия теплопроводов с окружающей средой. Необходимость усовершенствования действующих правил по проектированию тепловой изоляции оборудова-

ния и трубопроводов [2] диктуется Энергетической стратегией России [3], в которой организация оптимальных режимов функционирования тепловых сетей является одной из составляющих в мероприятиях по снижению общего уровня тепловых потерь. Разработка мероприятий по организации оптимальных режимов функционирования тепловых сетей наиболее предпочтительна в настоящее время с привлечением методов и средств математического моделирования физических процессов, протекающих в основных элементах рассматриваемых систем.

Целью данной работы является численное исследование тепловых режимов и тепловых потерь в тепловых сетях, проложенных канальным способом, на базе решения сопряженной задачи кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается наиболее типичный вариант прокладки тепловых сетей в РФ [4] – подземный непроходной неветилируемый железобетонный канал и два трубопровода (подающий

и обратный), изолированные минеральной ватой и защитным покровным слоем (рисунок 1: 1 – металлическая стенка трубы; 2 – слой тепловой изоляции; 3 – покровный слой; 4 – полость

канала; 5 – железобетонная стенка канала; 6 – грунт; п – подающий трубопровод; о – обратный трубопровод). Для рассматриваемой области (рисунок 1) решается двумерная сопряженная стационарная задача кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса [5] в системе «подземный каналный двухтрубный теплопровод – окружающая среда». Решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы 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 [6–8].

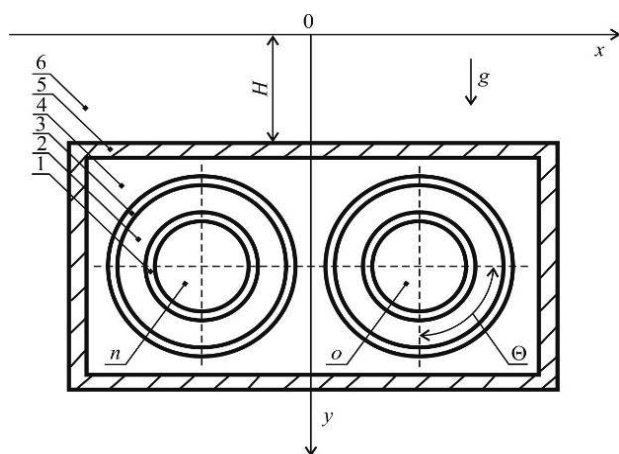


Рис.1 Схема области решения.

В настоящее время выполнен цикл работ [6–8], посвященный исследованию теплопереноса в зонах прокладки теплопроводов. В [6–8] анализ тепловых режимов и тепловых потерь основаны на решении стационарных уравнений теплопроводности с соответствующими условиями однозначности различными методами. Математические модели и методики расчета тепловых потерь [6–8] апробированы на прак-

тике и показали вполне удовлетворительное согласие с данными испытаний некоторых участков тепловых сетей [7, 8], однако имеют ряд ограничений, основными из которых являются отсутствие учета влияния свободно-конвективного движения воздуха и теплового излучения в полости канала (рисунок 1), а также взаимодействия совместно проложенных теплопроводов друг с другом и с окружающей средой.

Исследования теплопереноса в элементах конструкций однострубных теплопроводов с учетом конвективного движения воздуха и наличия теплообмена излучением в полости канала [9] подтвердили целесообразность перехода к сопряженным постановкам задач [5] при описании рассматриваемых процессов. В [9] были показаны обоснованность предложенного перехода, существенное влияние распределений температур в полости канала на формировании теплового режима рассматриваемых систем и необходимость учета этого фактора при прогностическом моделировании работы тепловых сетей.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

- Не рассматриваются процессы переноса тепла в теплоносителях и металлических стенках труб;
- Влага, содержащаяся в воздухе каналного пространства, не проникает в теплозащитную конструкцию теплопровода;
- Не учитывается наличие фазовых переходов;
- Воздух, заполняющий полость канала (рисунок 1), считается несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [10].

Принятые допущения, с одной стороны, не накладывают принципиальных ограничений на физическую модель рассматриваемой системы (рисунок 1), а с другой – позволяют определенным образом упростить алгоритм и метод решения поставленной задачи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МЕТОД РЕШЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Математическая постановка задачи для рассматриваемой в данной работе конфигурации теплопровода (рисунок 1) приведена в [9].

Задача в [9] решена методом конечных элементов [11] с использованием аппроксимации Галеркина [12, 13]. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, имеющей 112993 узлов и состоящей из 19484

элементов. Воздушная полость канала (рисунок 1) содержала 73898 узла и 16163 элемента. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [13].

Исследования проводились для трубопроводов с диаметрами условного прохода 600 мм, изолированных минеральной ватой (толщина 70 мм) [4].

Покровный слой – песчанно-цементная штукатурка по каркасу из металлической сетки толщиной 20 мм [4]. Рассматривался типичный для тепловых сетей РФ сборный железобетонный канал марки КЛс 210-210 [4] с толщиной стенок 135 мм. Полость канала занимал воздух с относительной влажностью 90 %. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H = 1$ метр (рисунок 1).

Температуры внутренних поверхностей слоев тепловой изоляции подающего и обратного трубопроводов принималась $T_{\text{н}}=363$ К и $T_{\text{о}}=323$ К и соответствовали среднегодовым температурам теплоносителя в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по одному из основных температурных графиков [2]

– 150/70 °С. Температура окружающей среды во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [14] – $T_7=264,2$ К. Значение коэффициента теплоотдачи от грунта к окружающей среде составляло $\alpha=5$ Вт/(м²•К). Предполагалось, что теплопровод проложен в песчаном мерзлом грунте.

Исследования проводились при следующих значениях теплофизических характеристик [15, 16]: $\lambda_2=0,059$ Вт/(м•К), $c_2=670$ Дж/(кг•К), $\rho_2=206$ кг/м³; $\lambda_3=0,87$ Вт/(м•К), $c_3=837$ Дж/(кг•К), $\rho_3=1750$ кг/м³, $\varepsilon_3=0,8$; $\lambda_4=1,54$ Вт/(м•К), $c_4=887$ Дж/(кг•К), $\rho_4=2200$ кг/м³, $\varepsilon_4=0,85$; $\lambda_5=0,025$ Вт/(м•К), $c_5=1032,5$ Дж/(кг•К), $\rho_5=1,22$ кг/м³; $\lambda_6=3,7$ Вт/(м•К), $c_6=1005$ Дж/(кг•К), $\rho_6=2000$ кг/м³.

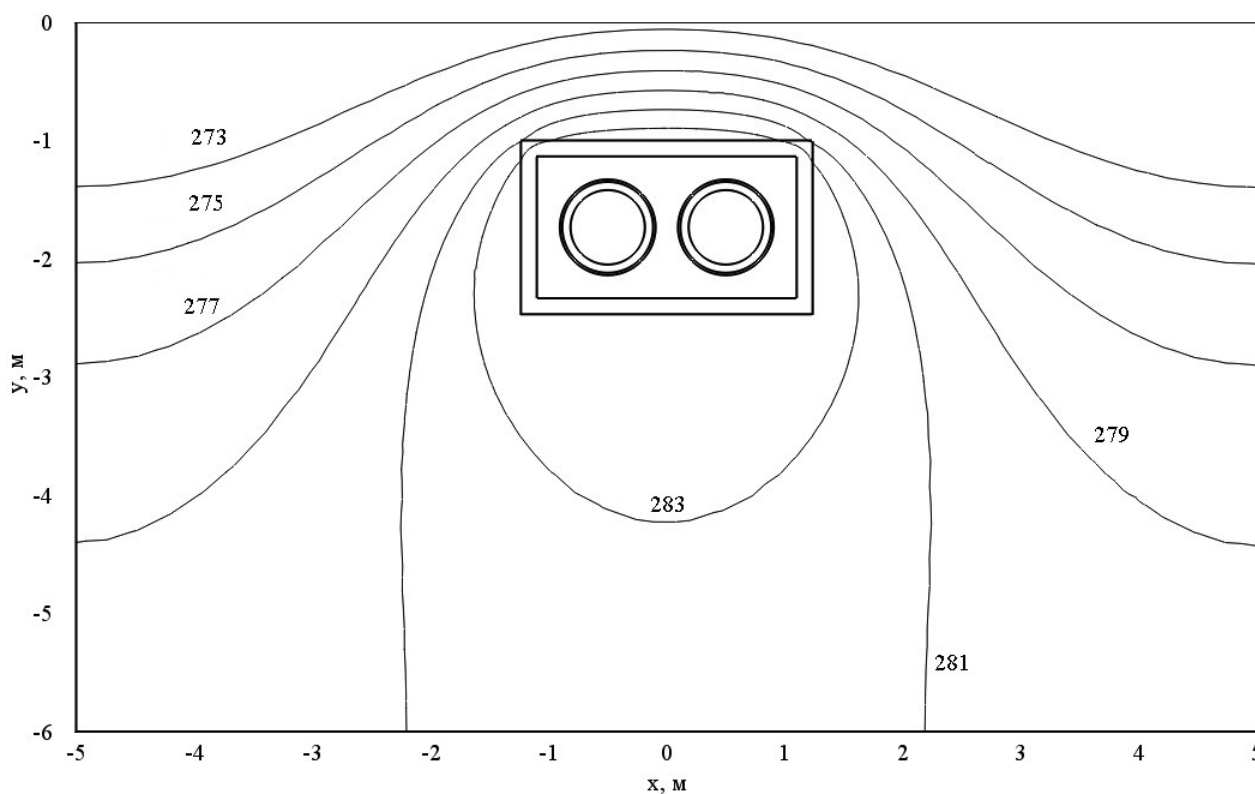


Рис.2 Типичное температурное поле грунта в зоне прокладки теплопровода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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 проведенной ранее проверкой [9] адекватности

предложенного подхода к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла. Относительная погрешность расчетов тепловых потерь во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при проведении исследований тепловых режимов систем транспортировки тепла.

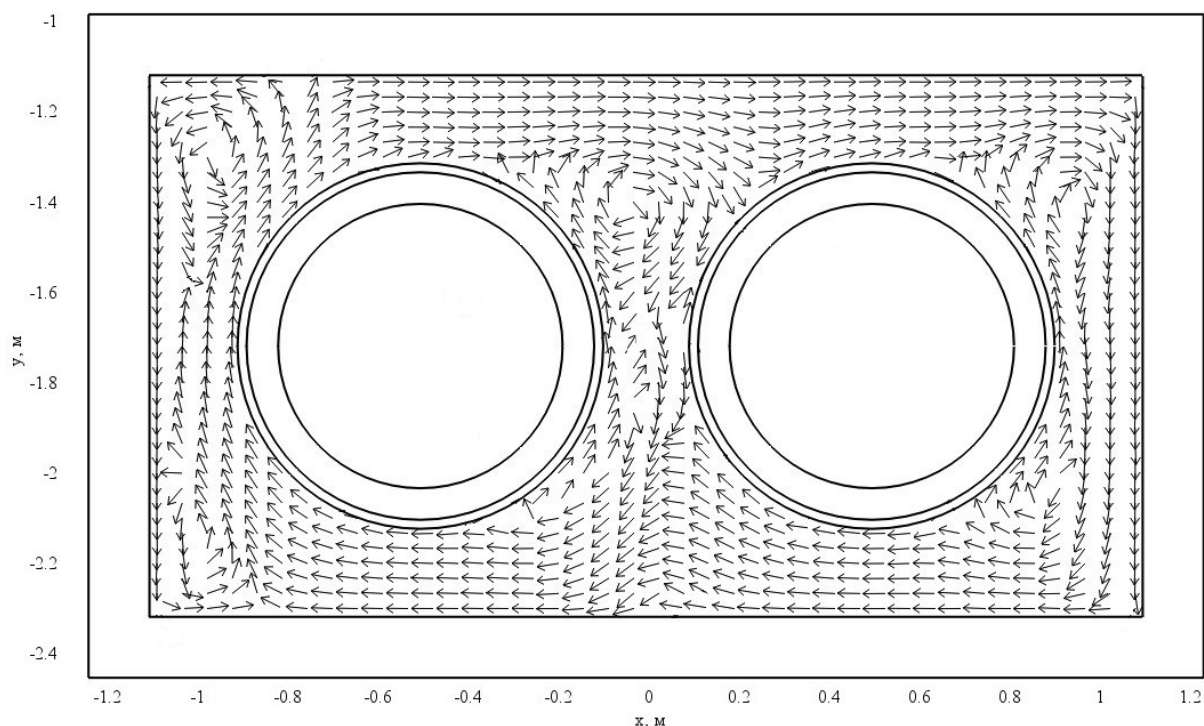


Рис.3 Поле скорости воздуха в полости канала теплопровода.

Для рассматриваемого в данной работе случая величины тепловых потерь рассматриваемого теплопровода (рисунок 1) с учетом теплового излучения составляют $Q_2=221,34$ Вт/м, а без учета теплового излучения $Q_1=213,36$ Вт/м. Также был выполнен расчет тепловых потерь ($Q_{\text{сп}}=209,01$ Вт/м) с использованием действующих правил по проектированию тепловой защиты трубопроводов тепловых сетей [2] для конфигурации теплопровода соответствующей рассматриваемой системе (рисунок 1).

Результаты расчета тепловых потерь свидетельствуют о том, что учет теплообмена излучением в полости канала теплопровода приводит к увеличению расчетных значений тепловых потерь на 3,60 %, а расхождение между результатами расчета Q_2 и $Q_{\text{сп}}$ составляет величину 5,57 %, что подтверждает адекватность предлагаемого подхода к анализу тепловых режимов теплопроводов.

Следует отметить, что, как показали результаты предшествующих исследований [9], наименьшее отклонение между результатами расчетов Q_2 и $Q_{\text{сп}}$ соответствует прокладке теплопровода в мерзлых грунтах, что позволяет сделать вывод о том, что методика расчета [2] дает наиболее корректные значения тепловых потерь при прокладке тепловых сетей в грунтах, имеющих достаточно высокую теплопроводность.

На рисунке 2 приведено типичное температурное поле грунта в зоне прокладки двухтрубного теплопровода. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области не превышало 0,5 %. Установлено, что изотермические линии (рисунок 2) сгущаются у поверхности грунта непосредственно над теплопроводом и более разрежены при удалении от теплопровода, что отражает реальный режим работы теплопровода и качественно соответствует результатам исследований, приведенным в [6–8].

Структура течения воздуха в полости канала двухтрубного теплопровода является достаточно сложной (рисунок 3) и состоит из основного циркуляционного течения и нескольких вторичных вихрей. Основное циркуляционное течение направлено от более нагретого подающего трубопровода к менее нагретому – обратному трубопроводу в верхней части канала и в обратном направлении в нижней части. Наличие вторичных вихрей обусловлено влиянием подающего и обратного трубопроводов на основное циркуляционное течение и наличием достаточно интенсивного теплоотвода по периметру канала.

По результатам численного моделирования было выявлено, что максимальная скорость

движения воздуха в полости канала двухтрубного теплопровода (рисунок 1) не превышает 0,05 м/с. Также установлено, что температура воздуха в канале является практически постоянной величиной – максимальное отклонение

температур не превышает 0,5 К, что объясняется структурой течения воздуха (рисунок 3). При этом следует отметить, что для однострубных теплопроводов это отклонение составляло несколько градусов [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ИЛИ И ТО И ДРУГОЕ

Проведено численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс на базе сопряженной кондуктивно-конвективно-радиационной модели переноса.

Показаны необходимость учета теплообмена излучением в полости канала теплопровода,

целесообразность применения предложенного подхода при моделировании тепловых режимов работы тепловых сетей и возможность усовершенствования действующих правил [2] по проектированию тепловой изоляции трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бытенский О.М. Энергосбережение в тепловых сетях систем теплоснабжения / О.М. Бытенский // Энергетик. – 2009. – № 5. – С. 25–28.
2. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.
3. Развитие теплоснабжения в России в соответствии с Энергетической стратегией до 2030 г. // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 2. – С. 6–9.
4. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. / Под ред. А. А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с.
5. Лыков А.В. Сопряженные задачи конвективного теплообмена / А.В. Лыков, А.А. Алексащенко, В.А. Алексащенко. – Минск: Наука и техника, 1971. – 346 с.
6. Иванов В. В. Моделирование процессов теплопереноса в зоне прокладки теплотрасс и в неоднородных ограждающих конструкциях методом конформных отображений / В.В. Иванов, А.Н. Бутенко, Л.В. Карасева // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2010. – № 6(19). – С. 46–52.
7. Иванов В.В. Исследование и качественное прогнозирование состояния участков тепловых сетей / В.В. Иванов, С.В. Шкребеко // Труды V Российской национальной конференции по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – Т. 7. – С. 110–113.
8. Иванов В.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс / В.В. Иванов, В.В. Василенко, С.В. Черныш // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 1. – С. 66–69.
9. Кузнецов Г.В. Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5–6. – С. 12–20.
10. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен / Й. Джалурия. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
11. Самарский А.А. Численные методы математической физики / А.А. Самарский, А.Н. Гулин. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.
12. Митчел Э. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными / Э. Митчел, Р. Уэйт. – М.: Мир, 1981. – 216 с.
13. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
14. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
15. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник / А.Я. Гува. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
16. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.