

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ОДНОТРУБНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОЛОСТИ КАНАЛА

В.Ю. Половников

Томский политехнический университет

E-mail: polov@tpu.ru

Проведен численный анализ тепловых режимов теплопроводов на базе решения сопряженных задач теплопереноса в системе «подземный каналный однотрубный теплопровод – окружающая среда». Показано, что учет конвективного движения воздуха в полости канала позволяет проводить детальный анализ тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, теплопровод, тепловые режимы, тепловые потери.

Key words:

Mathematical modeling, heat pipeline, thermal modes, thermal loss.

Введение

Исследование тепловых режимов работы теплопроводов, как в штатных, так и во внештатных условиях является актуальной задачей при анализе эффективности работы и создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

В настоящее время проектирование и расчет тепловой защиты систем транспортировки тепла основаны на применении общих балансовых соотношений [1], не учитывающих многие особенности взаимодействия теплопроводов с окружающей средой и реальные механизмы теплообмена. Основная используемая на практике методика расчета тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [1] не учитывает разнородность и нестационарность процессов теплообмена, наличие фазовых переходов, изменение условий эксплуатации и условий взаимодействия теплопроводов с окружающей средой.

Отсутствие адекватной методики теплового расчета, учитывающей основные значимые факторы и процессы, приводящие к интенсификации тепловых потерь, сдерживает разработку энергосберегающих систем транспортировки тепла, мероприятий, направленных на обеспечение оптимальных температурно-влажностных режимов работы теплопроводов, и затрудняет расчетную оценку эффективности применения новых видов теплоизоляционных материалов и конструкций, способных обеспечить необходимый уровень энергосбережения.

Целью данной работы является численный анализ тепловых режимов однотрубных каналных теплопроводов на базе решения сопряженных задач теплопереноса.

Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная в РФ конфигурация теплотрубопровода подземной прокладки [2] – непроходной железобетонный канал и трубопровод, изолированный минеральной ватой и защитным покровным слоем (рис. 1).

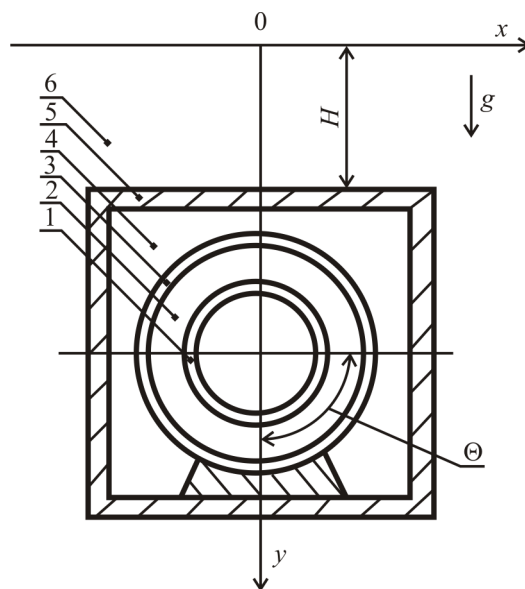


Рис. 1. Схема области решения: 1) металлическая стенка трубы; 2) слой тепловой изоляции; 3) покровный слой; 4) полость канала; 5) железобетонная стенка канала; 6) грунт

Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная сопряженная стационарная задача конвективно-кондуктивного теплопереноса в системе «слой тепловой изоляции – покровный слой – полость канала – стенка канала теплопровода – грунт – окружающая среда».

В настоящее время при постановке подобных задач используется следующая последовательность расчета тепловых потерь [1–4]. Определяются термические сопротивления теплопроводности изоляционной конструкции теплопровода, стенок канала и грунта, а также термические сопротивления теплоотдачи для воздуха в канале и на наружной поверхности грунта. Термические сопротивления теплоотдачи теплоносителя в трубе и теплопроводности металлической стенки трубы, вследствие их пренебрежимой малости, обычно не учитываются. Затем рассчитываются линейные тепловые потоки от теплоносителя в трубе к воздуху канал-

ного пространства и от воздуха в канале к окружающей среде. Для расчета тепловых потоков используются либо одномерные аналитические выражения [1, 2], либо двумерные численные модели теплопроводности [3, 4]. По известным величинам тепловых потоков из уравнения теплового баланса определяется температура воздуха в канале, а затем тепловые потери теплопровода.

Таким образом, из рассмотрения исключается теплоперенос в полости канала, а коэффициенты теплоотдачи к поверхностям в канальном пространстве определяются по рекомендациям [1] или с использованием многочисленных критериальных уравнений [5]. Но такое приближение не всегда является адекватным, потому что каждому из многочисленных возможных вариантов условий теплопереноса в полости канала теплопровода соответствует свое критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи.

По этим причинам целесообразным является переход при анализе тепловых режимов систем транспортировки тепла к сопряженным постановкам задач [6]. Кроме того, реальная практика эксплуатации теплопроводов показывает, что распределение температур в полости канала играет заметную роль в формировании теплового режима рассматриваемой системы. Соответственно для полного описания исследуемых процессов необходимо решать сопряженные задачи [6] для многосвязной области (рис. 1).

Следует отметить, что, в соответствии с действующей методикой [1], термическое сопротивление грунта рассчитывается с использованием приближенного соотношения, представляющего собой зависимость между некоторыми константами, геометрическими характеристиками теплопровода и коэффициентом теплопроводности грунта. Подобный подход к оценке термического сопротивления грунта хорошо зарекомендовал себя в практических расчетах, однако он не вполне соответствует современному уровню знаний о процессах теплопереноса.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

1. Не рассматриваются процессы переноса тепла в теплоносителе и металлической стенке трубы.
2. Теплофизические характеристики материалов являются постоянными и известными величинами.
3. Влага, содержащаяся в воздухе канального пространства, не проникает в теплозащитную конструкцию теплопровода.
4. Не учитывается наличие фазовых переходов в рассматриваемой области решения.
5. Воздух, заполняющий полость канала (рис. 1), считается несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [7].

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

Математическая модель

В предлагаемой постановке процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения (рис. 1) в двумерной постановке будет описываться:

- для воздуха в полости канала уравнениями энергии, движения и неразрывности:

$$c\rho\left(w_x\frac{\partial T_4}{\partial x}+w_y\frac{\partial T_4}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2}\right), \quad (1)$$

$$w_x\frac{\partial w_x}{\partial x}+w_y\frac{\partial w_x}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}\right), \quad (2)$$

$$w_x\frac{\partial w_y}{\partial x}+w_y\frac{\partial w_y}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2}\right)+g\beta(T_4-T_7), \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x}+\frac{\partial w_y}{\partial y}=0, \quad (4)$$

- в тепловой изоляции и покровном слое уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}+\frac{1}{x}\frac{\partial T_i}{\partial x}+\frac{1}{x^2}\frac{\partial^2 T_i}{\partial \Theta^2}=0, \quad i=2,3, \quad (5)$$

- в стенах канала и грунте уравнениями теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2}=0, \quad i=5,6. \quad (6)$$

При постановке задачи принималось, что на внутренней поверхности слоя тепловой изоляции поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя в трубе:

$$T_2 = \text{const}. \quad (7)$$

На границе раздела «грунт – окружающая среда» осуществляются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_6\frac{\partial T_6}{\partial y}=\alpha(T_6-T_7). \quad (8)$$

В местах соприкосновения слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial x}=\lambda_j\frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2,3,\dots,6, \quad i\neq j, \quad (9)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial y}=\lambda_j\frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2,3,\dots,6, \quad i\neq j, \quad (10)$$

Для тепловой изоляции и покровного слоя выполняются условия симметрии:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \Theta}=0, \quad i,j=2,3. \quad (11)$$

На достаточно большом расстоянии от теплопровода (рис. 1) градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\frac{\partial T_6}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad \frac{\partial T_6}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (12)$$

Скорость движения воздуха, находящегося в полости канала (рис. 1), на внешней поверхности покровного слоя и внутренней поверхности стенок канала равна нулю (условия прилипания):

$$w_x = w_y = 0. \quad (13)$$

Обозначения: T – температура, К; x, y, Θ – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; w_x, w_y – составляющие скорости в проекции на оси координат, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; g – ускорение силы тяжести, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Индексы: 2–6 – номера областей расчета (рис. 1); 7 – окружающая среда.

Метод решения и исходные данные

Рассматриваемая задача (1)–(13) решена методом конечных элементов [8] с использованием аппроксимации Галеркина [9, 10]. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, имеющей 30056 узлов и состоящей из 7880 элементов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [10].

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов

Материал Свойства	Тепловая изоляция	Покровный слой	Стенка канала	Грунт
λ , Вт/(м·К)	0,059	0,870	1,540	1,500
c , Дж/(кг·К)	670	837	887	1150
ρ , кг/м ³	206	1750	2200	1960

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм, изолированного минеральной ватой (толщина 70 мм) [2]. Покровный слой – песчанно-цементная штукатурка по каркасу из металлической сетки толщиной 20 мм [2, 11]. Рассматривался типичный для тепловых сетей РФ сборный одноячейковый железобетонный канал марки КЛс120–120 [11] с толщиной стенок 135 мм. Полость канала занимал воздух с относительной влажностью $\varphi=50\ldots 100\%$. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H=1$ м (рис. 1). Температура внутренней поверхности слоя тепловой изоляции равнялась $T_2=363,15$ К и соответствовала среднегодовой температуре теплоносителя в подающих трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по одному из основных температурных графиков [1] – 150/70 °С. Температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период [12] – $T_7=263,05$ К (г. Хабаровск), 264,35 К (г. Томск), 269,95 К (г. Москва). Коэффициент теплоотдачи от грунта к окружаю-

щей среде во всех вариантах численного анализа принимался равным $\alpha=15$ Вт/(м²·К).

В табл. 1 приведены значения [13] теплофизических характеристик тепловой изоляции, покровного слоя, стенок канала и грунта, использованные при проведении численных исследований тепловых режимов рассматриваемой системы (рис. 1).

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного моделирования приведены в табл. 2 и на рис. 2–6. На рис. 2–6 представлены типичные распределения основных характеристик рассматриваемой системы (рис. 1) при температуре окружающей среды $T_7=269,95$ К и относительной влажности воздуха в канале $\varphi=100\%$.

Таблица 2. Результаты численного исследования тепловых потерь теплопровода

T_7 , К	φ , %	q_L , Вт/м	δ , %	q_L^{en} , Вт/м
263,05	50	131,68	0,4	127,55
	75	132,21	0,4	
	100	132,43	0,3	
264,35	50	129,92	0,5	125,90
	75	130,52	0,5	
	100	130,71	0,3	
269,95	50	122,45	0,4	118,76
	75	123,07	0,3	
	100	123,25	0,2	

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимости и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается сравнением полученных результатов с известными экспериментальными [14] и теоретическими [3, 4] данными других авторов. Относительная погрешность расчетов δ (табл. 2) во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при проведении исследований тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Следует подчеркнуть, что результаты численного решения сформулированной выше задачи показали целесообразность перехода к сопряженным [6] постановкам при анализе тепловых режимов теплопроводов. Результаты численных экспериментов, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод об ожидаемом снижении тепловых потерь q_L теплопровода при соответствующем росте температуры окружающей среды T_7 . Возрастание относительной влажности воздуха в канале φ также приводит к соответствующему незначительному росту тепловых потерь вследствие увеличения эффективных теплофизических характеристик влажного воздуха.

Дополнительно были выполнены расчеты тепловых потерь q_L^{en} с использованием действующих правил по проектированию тепловой защиты тру-

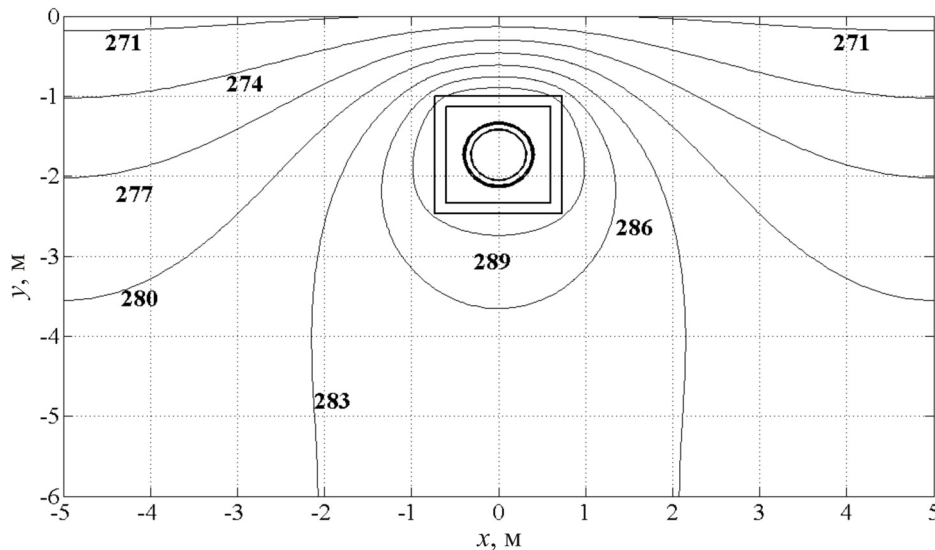


Рис. 2. Температурное поле грунта в зоне прокладки теплопровода

бопроводов тепловых сетей [1] для конфигурации теплопровода соответствующей рассматриваемой системе (рис. 1).

Сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь q_L с результатами расчетов q_L^{cn} , произведенных по нормативной методике [1], свидетельствует о том, что расхождение в результатах (табл. 2) составляет величину до 4 % в зависимости от характеристик рассматриваемой системы, что в целом подтверждает адекватность предлагаемой в данной работе математической модели.

На рис. 2 приведено типичное температурное поле грунта в зоне прокладки теплопровода. Хотя при постановке задачи предполагалось использование области неограниченных размеров (выражения (12)), при проведении численного анализа тепловых потерь использовалась расчетная область размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение градиентов температур на границах области не превышало 0,5 %.

Установлено, что изотермические линии (рис. 2) сгущаются у поверхности грунта непосредственно над теплопроводом и более разрежены при удалении от теплопровода, что отражает реальный режим работы теплотрубопровода и качественно соответствует результатам исследований приведенным в [3, 4]. Необходимо отметить, что математические модели и методики расчета тепловых потерь [3, 4], апробированные на практике и показавшие вполне удовлетворительное согласие с данными испытаний участков теплосетей [3], имеют ряд ограничений, основным из которых является отсутствие учета влияния свободно-конвективного движения воздуха в полости канала теплопровода (рис. 1).

На рис. 3, 4 приведены линии тока и типичное поле скорости в полости канала теплопровода.

Видно, что в полости канала теплообмен осуществляется в условиях естественной конвекции в замкнутом объеме [7].

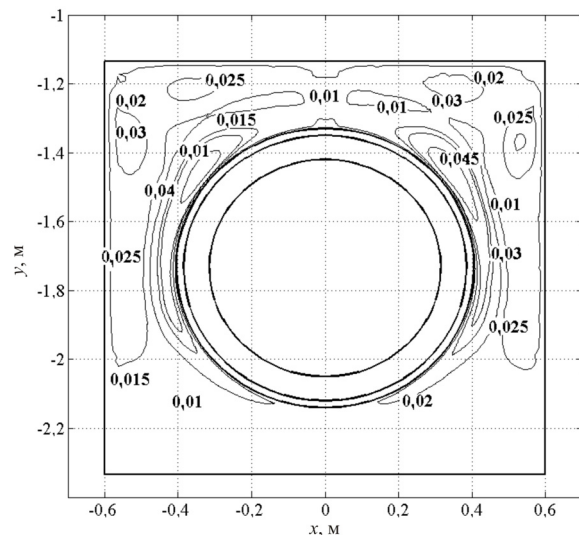


Рис. 3. Линии тока воздуха в полости канала теплопровода

Структуру течения воздуха в полости канала в общем виде можно представить следующим образом. Воздух поднимается со дна канала к трубопроводу и нагревается. Достигнув перекрытия канала, воздух охлаждается и движется к боковым стенкам, где продолжает охлаждаться, соприкасаясь с холодными стенками, и опускается вниз. Таким образом, в полости канала однотрубного теплопровода наблюдается два симметричных циркуляционных течения, что полностью соответствует представлениям о естественной конвекции в замкнутых объемах [7].

По результатам численного моделирования было установлено, что скорость движения воздуха в полости канала (рис. 3) не превышает 0,05 м/с и определяется величиной подъемной силы, учтенной в ур. (3).

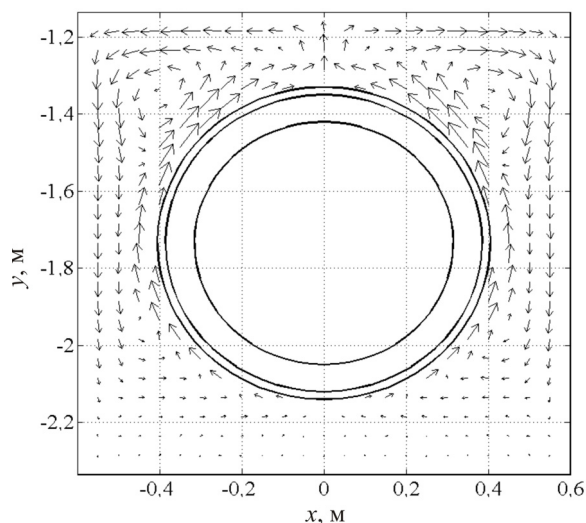


Рис. 4. Типичное поле скорости потока воздуха в полости канала теплопровода

На рис. 5, 6 представлены наиболее информативные распределения температур в полости канала однотрубного теплопровода: на расстоянии 0,5 м от оси симметрии (рис. 5) и на расстоянии 0,035 м от дна канала (рис. 6).

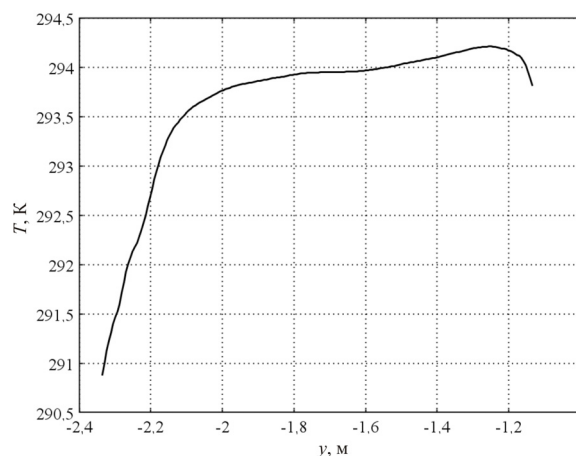


Рис. 5. Распределение температур в полости канала теплопровода на расстоянии 0,5 м от оси симметрии

Из рис. 5 видно, что распределения температур в полости канала в вертикальном направлении является неравномерным, а изменение температур

соответствует линиям тока в полости канала. Средняя температура воздуха в полости канала составляет 293 К. Наименьшая температура воздуха устанавливается вблизи поверхности дна канала (рис. 6), причем вдоль всей поверхности дна воздух имеет практически одинаковую температуру.

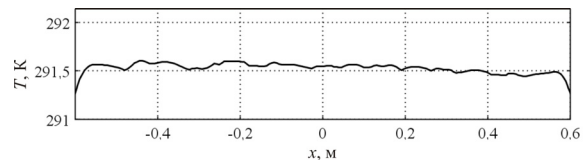


Рис. 6. Распределение температур в полости канала теплопровода на расстоянии 0,035 м от дна канала

В [14] приведены результаты экспериментальных исследований температурных полей в полости канала теплопровода. Эксперименты [14] проводились с использованием модели однотрубного канального теплопровода, при этом измерялись значения температур стенок канала и воздуха в различных точках живого сечения. Сопоставление данных экспериментальных исследований [14] температурных полей в полости канала однотрубного теплопровода с результатами численного анализа говорит об их хорошем качественном соответствии, что подтверждает адекватность предлагаемой модели и возможность использовать ее при анализе тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Заключение

Методом конечных элементов решена сопряженная задача конвективно-кондуктивного теплопереноса в системе «подземный канальный однотрубный теплопровод – окружающая среда».

Проведен анализ тепловых режимов теплопровода в зависимости от температуры окружающей среды.

Установлены значения основных характеристик рассматриваемой системы, показаны адекватность и возможность применения предложенной модели при анализе тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П1445 от 03.09.09) и при частичной поддержке РФФИ (грант № 08–08–00143-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.
2. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с.
3. Иванов В.В., Василенко В.В., Черныш С.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 1. – С. 66–69.
4. Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне подземных теплотрасс // Матер. II Росс. национальной конф. по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 103–105.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
7. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
8. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.
9. Митчел Э., Уэйт Р. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. – М.: Мир, 1981. – 216 с.
10. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. – М.: Наука, 1989. – 288 с.

11. Переверзев В.А., Шумов В.В. Справочник мастера тепловых сетей. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 272 с.
12. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с.
13. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. — Новосибирск: Сибвуиздат, 2002. — 300 с.
14. Витальев В.П. Исследование режимов высыхания изоляции подземных теплопроводов / Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. — Вып. 11. — С. 36–49.

Поступила 31.08.2010 г.

УДК 531.7,53.082.2;550.34.038.8

ПРИНЦИПЫ РЕГИСТРАЦИИ ИНЕРЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОНВЕКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

И.А. Бабушкин, В.А. Демин, Д.В. Пепеляев

Пермский государственный университет
E-mail: demin@psu.ru

Теоретически изучено влияние внешних инерционных воздействий на конвективные течения в подогреваемой снизу ячейке Хеле–Шоу. Проведен расчет температурных полей и формы течений при действии инерционных сигналов, ориентированных произвольно в плоскости широких граней. Результаты расчетов планируется использовать при проектировании прибора, способного регистрировать и распознавать инерционные воздействия по амплитуде и частоте. На основе численного моделирования выполнен подбор рабочей жидкости и найдены оптимальные значения геометрических параметров конвективной камеры разрабатываемого датчика.

Ключевые слова:

Конвективные датчики, инерционные воздействия, термопарные измерения, численное моделирование, принципы регистрации инерционных сигналов.

Key words:

Convective sensors, inertial influence, thermocouple measurements, numerical modeling, registration principles of inertial signals.

Влиянию инерционных ускорений на неоднородно нагретые гидродинамические системы посвящено множество теоретических и экспериментальных работ [1–4]. Интерес к данной тематике обусловлен тем, что по отклику гидродинамической системы на внешнее силовое воздействие можно судить об интенсивности и форме инерционного сигнала. Однако утверждать, что данная проблематика хорошо разработана и результаты исследований в этом направлении широко применяются на практике, было бы неверно. Спектр разнообразных инерционных воздействий чрезвычайно широк: это высокочастотные вибрации и вибрации конечной частоты, короткие по времени сигналы ударного типа, имеющие как техногенный, так и природный характер, различные сейсмические воздействия и т. п. К обсуждаемому кругу вопросов можно даже отнести проблему мониторинга микрогравитационного шума на борту орбитальной станции [4]. В настоящее время существует множество способов регистрации тех или иных инерционных воздействий. Технически каждый метод основывается на определенных физических принципах и обладает своими плюсами и минусами.

Особую нишу среди приборов, предназначенных для регистрации инерционных воздействий, занимают конвективные датчики. Принцип работы конвективных датчиков основывается на реги-

страции изменений температурного поля неоднородно нагретой жидкости на фоне конвективного движения. Наличие дополнительного вклада в течение, обусловленного переменными массовыми силами, отражается на показаниях термопар. В настоящее время методики термопарных измерений позволяют разрешать инерционные ускорения порядка $10^{-3} \dots 10^{-4} g$. Свойство восприимчивости конвективных движений к внешним воздействиям дает возможность конструировать приборы и использовать их в качестве акселерометров при мониторинге природно-техногенной сферы, в авиационной и космической технике.

Устройство имеющихся конвективных датчиков (в том числе промышленных [5]), как правило, таково, что в них реализуются трехмерные конвективные течения. Многолетний опыт исследований показывает, что в случае сложного нестационарного воздействия в таких полостях могут возникать вторичные осредненные течения, форма которых сильно зависит от начальных условий. Неконтролируемость течений часто приводит к неправильной интерпретации сигналов с термопар. Авторами защищается идея разработки и конструирования лабораторного образца низкочастотного датчика инерционных ускорений на основе конвективной ячейки Хеле–Шоу [6]. В частности, имеются все основания для использования данного датчика в геофизике [7].