

необходимости учета наличия испарения при проведении анализа тепловых режимов теплопроводов, работающих с увлажненной изоляцией.

Вклад эффекта испарения в суммарные тепловые потери составляет от 1,7 до 21 % (см. табл. 2, 3) в зависимости от значений φ_v и ψ . Анализ нестационарности процессов теплопереноса для рассматриваемой задачи свидетельствует о том, что время выхода процессов на стационарный режим не превышает 20 000 секунд, что хорошо согласуется с результатами проведенных ранее исследований [2].

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

Список литературы:

1. 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. 47–54.
2. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплового состояния трубопровода в условиях затопления с учетом нестационарности процесса насыщения теплоизоляции влагой // Теплоэнергетика. – 2008. – № 5. – С. 60–64.
3. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
4. Санду С.Ф. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в испарительно-конденсационных системах теплопередачи энергетических установок // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 60–63.
5. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 440 с.
6. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.-Л.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

УДК 536.485

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Пискунов М.В., Лазарев Д.М., Половников В.Ю., к.т.н.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: polov@tpu.ru

Тепловая изоляция ограждений холодильных сооружений эксплуатируется в тяжелых условиях [1], прежде всего из-за непрерывных изменений температуры и влажности наружного воздуха, переменного воздействия солнечной радиации и ветра.

В настоящее время отсутствуют какие-либо модели и методики анализа тепловых режимов работы тепловой защиты систем холодоснабжения, описывающие реальные физические процессы, протекаю-

щие в пористой структуре тепловой изоляции и механизмы взаимодействия с окружающей средой [1]. В связи с вышесказанным разработка новых подходов к анализу тепловых режимов и оценке теплопритоков к холодильным сооружениям различного назначения приобретает особую актуальность.

Целью данной работы является численное исследование температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей и анализ возможности разрушения изоляции.

Постановка задачи

Рассматривается участок трубопровода для транспортировки криожидкостей. Для тепловой изоляции трубопровода совместно решаются одномерные нестационарные задачи теплопроводности и термоупругости.

Внешний контур изоляции трубопровода контактирует с окружающей средой. Для задачи теплопроводности на внутренней и внешней границах слоя тепловой изоляции вводятся граничные условия первого и третьего рода соответственно. В начальный момент времени температура равна постоянной величине. Предполагается, что температура внутренней поверхности изоляции равна температуре холодной жидкости и что в результате охлаждения изоляции в ней возникают температурные напряжения.

Математическая модель

Математическая постановка задачи описывается следующими уравнениями [1, 2]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{xx} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{yy} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{yy} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{zz} = \lambda e + 2\mu \varepsilon_{zz} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_p \cdot T; \\ \sigma_{xy} = 2\mu \varepsilon_{xy}; \\ \sigma_{yz} = 2\mu \varepsilon_{yz}; \\ \sigma_{zx} = 2\mu \varepsilon_{zx}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma(x, \tau) = \frac{\alpha_p \cdot E}{1 - \nu} \left[\frac{1}{\delta} \int_0^\delta T(x, \tau) dx - T(x, \tau) \right]. \quad (3)$$

Начальные условия:

$$T = T_{нач} = const, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad \tau = 0; \quad (4)$$

Граничные условия:

$$r = R_1, T = T_{v1} = const, \tau > 0; \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_{oc}), \quad r = R_2, \quad \tau > 0; \quad (6)$$

Обозначения: R – граница области расчета; T – температура, К; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; τ – время, с; r – координата, м; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); σ – компонент напряжения; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Мпа; λ и μ – постоянные Ляме; ε – компонент деформации; e – объемная деформация, α_p – коэффициент линейного температурного расширения, К⁻¹.

Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(6) решена методом прогонки по неявной разностной схеме и методом Симпсона [2].

В качестве примера рассматривался типичный участок трубопровода для транспортировки сжиженного углеводородного газа – диаметром 400 мм [3]. В качестве изоляционного материала выбраны минеральная вата и пенополиуретан ППУ-104Б толщиной 280 мм. Температура внутренней границы R_1 равна температуре криожидкости в резервуаре $T_{ж} = 111$ К [4]. Температура окружающей среды $T_{oc} = 293$ К. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности изоляции принимался равным $\alpha = 5$ Вт/(м²·К). Время расчета задавалось равным $\tau = 3 \cdot 10^5$ с.

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик [3–6] веществ и материалов, использовавшихся при проведении численного моделирования.

Таблица 1. – Теплофизические характеристики изоляционных материалов

Характеристика	k , Вт/(м·К)	c , Кдж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	$\alpha_p \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	E , Мпа	μ	σ , Мпа
Пенополиуретан	0,0397	0,46-0,8	390	66–71	1,15	0,33	1,4
Минеральная вата	0,047	0,88	130	7,7	0,15– 0,25	0,17	0,01– 0,04

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного моделирования температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей приведены на рисунках 1 и 2.

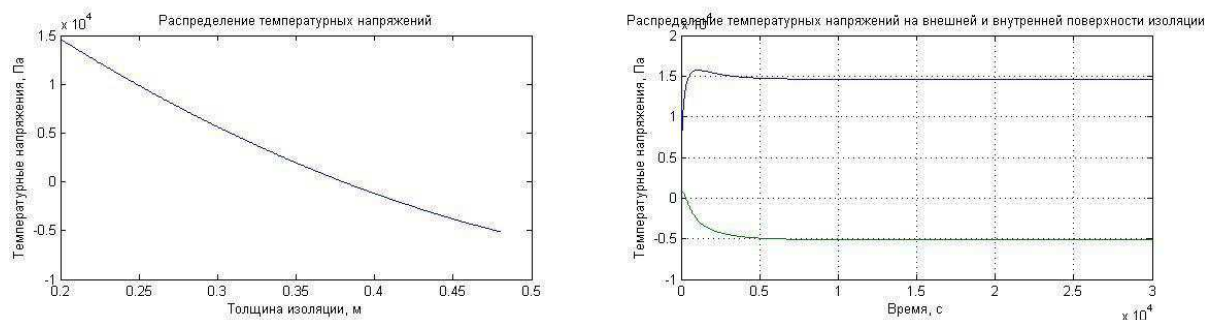


Рис. 1. Результаты моделирования для пенополиуретана

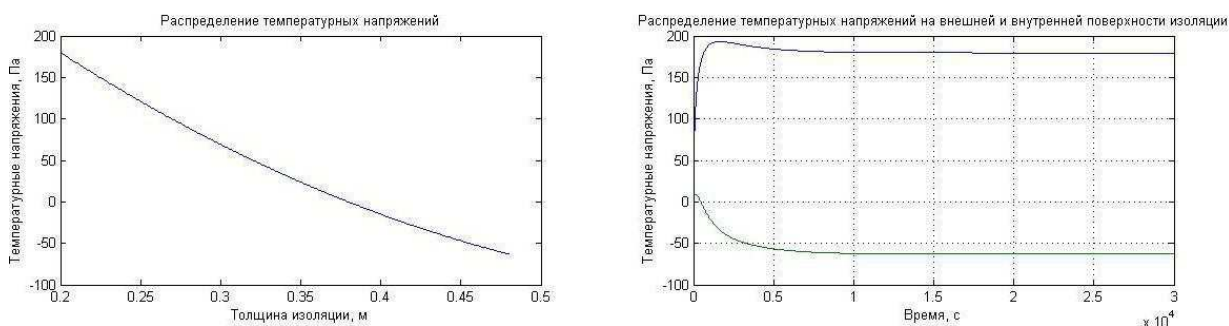


Рис. 2. Результаты моделирования для минеральной ваты

Сопоставление теплофизических характеристик используемых изоляционных материалов (см. табл. 1) с полученными в результате моделирования данными (см. рис. 1, 2) позволяет сделать вывод о том, что при данных начальных условиях, значения температурных напряжений не превышают табличных (как для пенополиуретана, так и для минеральной ваты). Исходя из физико-механических, физико-химических и термоупругих свойств пенополиуретана, результат моделирования достаточно закономерен, что нельзя сказать про результат моделирования температурных напряжений для минеральной ваты.

Проведено численное исследование температурных напряжений в низкотемпературной изоляции трубопроводов для транспортировки криожидкостей и анализ возможности разрушения изоляции. Для исследуемых образцов изоляционных материалов установлено, что при заданных условиях изоляция может эксплуатироваться.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а.

Список литературы:

1. Половников В.Ю., Хабибулин А.М. Численное моделирование теплопереноса в ограждающих конструкциях резервуаров для хранения криожидкостей с учетом промерзания тепловой изоляции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 33–36.

2. Кинжибекова А.К., Никифоров А.С., Приходько Е.В. Влияние температурных деформаций кладки на тепловые потери теплоиспользующих агрегатов // Промышленная энергетика. – 2007. – № 12. – С. 34–35.
3. Кузнецов Г.Ф., Бельский В.И., Горбачев В.П. Тепловая изоляция. – М.: Стройиздат, 1985. – 421 с.
4. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 431 с.
5. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
6. ГОСТ 21880-2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные. – М.: Стандартинформ, 2012. – 10 с.

УДК 532.529

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДА ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ

Агальцов А.М., Вавилов С.Н.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

E-mail: agaltsovam@gmail.com

Интерес исследователей к явлению парового взрыва при кипении недогретой до температуры насыщения воды имеет на данный момент времени долгую и богатую историю [1, 2]. Однако, несмотря на большой объем, как теоретических, так и экспериментальных работ по данной проблеме вопрос о природе возникновения и физике этого явления остается открытым до сих пор. Такая ситуация в первую очередь складывается из-за крайне малых времен протекания происходящих процессов, что осложняет достоверное количественное измерение таких параметров, как температура и давление, а также приводит к существенным трудностям при анализе полученных характеристик. С другой стороны достаточно продуктивным и информативным инструментом при исследовании парового взрыва может послужить использование скоростной видео регистрации, которая сейчас имеет гораздо более слабые частотные ограничения, чем контактные датчики температуры и датчики давления.

Используемая в данном исследовании экспериментальная установка состояла из следующих элементов:

1. Наполненного до определенного уровня дистиллированной недеаэрированной водой стеклянного сосуда с плоскими стенками. Для контроля температуры воды использовалась хромель-алюмелевая термопара.
2. Нагревательного элемента, выполненного в форме полого цилиндра и работающего по принципу джоулева нагрева, предназначенного для задания первоначальной температуры исследуемых образцов.