

Д. В. Алявин, А. А. Шестаков, О. В. Стоянов

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕРМОРАСШИРЯЕМОГО ПОЛИМЕРНОГО МОДИФИЦИРОВАННОГО РУКАВА В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ключевые слова: полимер, трубопровод, восстановление, терморасширение, теплопроводность, теплоёмкость.

Рассмотрена физико-математическая модель процесса терморасширения полимерного сложно-модифицированного рукава, предназначенного для восстановления и футеровки внутренней поверхности трубопроводных систем различного назначения.

Key words: polymer, pipeline, renewal, thermo-expansion, thermal conductivity, thermal capacity.

This article provides the physico-mathematical model of polymer hard-modified tube thermo-expansion process. The tube is meant for renewal and lining of the various-application pipeline systems inner surface.

Введение

Технология по использованию терморасширяемого рукава из сложно-модифицированного термопластичного полимера применяется для использования в качестве защитного покрытия внутренней поверхности трубопроводов, предназначенных для транспорта всевозможных жидкостей и газов, различной температуры эксплуатации. Основным свойством терморасширяемого рукава из сложно-модифицированного полимера является способность увеличивать свой диаметр под воздействием высокой температуры (от 80^0 до 200^0C). При нагревании рукав, расширяясь, плотно охватывает внутреннюю поверхность трубы, на которой происходит процесс расширения, повторяя его контуры, и обеспечивает механическую и изоляционную защиту.

Особенностью использования терморасширяемого рукава является то, что рукав может прокладываться на участках трубопроводов длиной до 300 метров, причем прокладка возможна на сложных криволинейных участках, укомплектованных температурными компенсаторами и механическими элементами (соединение трубопроводов с помощью переходов с различными внутренними диаметрами, сварочный шов, смятие, вздутие и т.д.). Терморасширяемый рукав, за счет своей эластичности и своего меньшего наружного диаметра, отличного от внутреннего диаметра защищаемого трубопровода, свободно пропускается через покрываемый участок трубопровода. За счет последующего прогрева терморасширяемого рукава теплогенератором происходит процесс расширения до первоначальной формы, которая задается в процессе изготовления терморасширяемого рукава в соответствии с техническим заданием (диаметр, коэффициент расширения, толщина, цвет, параметр по эластичности, параметр на разрыв и т.д.).

Физико-математическая модель восстановления терморасширяемого полимерного модифицированного рукава

На первом этапе разработки технологии была рассчитана физико-математическая модель восстановления терморасширяемого полимерного модифицированного рукава.

Используемую в рамках НИОКР трехмерную модель трубопровода, состоящую из сложных криволинейных участков, заменим на линейную, состоящую из одной горизонтальной трубы. В связи с асимметричностью трубы, можно свести задачу теплопереноса к двумерной, переходя к цилиндрическим координатам. Будем считать, что теплопередача осуществляется двумя путями: конвекцией вместе с нагретым паром вдоль рукава и процессом теплопроводности через стенку рукава и поверхность трубы. Поэтому процесс теплопередачи разделим на два одномерных этапа: распространение вдоль и поперек рукава. Тогда решение двумерной задачи можно свести к решению двух одномерных задач, для которых в простейших случаях при постоянных коэффициентах теплопередачи существуют аналитические решения.

В начальный момент времени рассматриваемая система (участок рукава в стальной трубе длиной $L=10$ метров и диаметром $D=108$ мм) имеет вид, изображенный на рисунке 1.

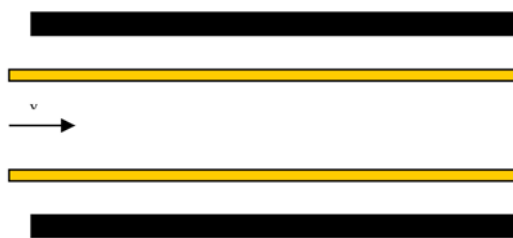


Рис. 1 – Участок рукава в стальной трубе в начальный момент времени

Будем предполагать, что полимерный рукав при нагреве до определенной критической температуры очень быстро (практически мгновенно) увеличивается в диаметре до внутренней поверхности трубы. Будем также считать, что время восстановления каждого участка рукава состоит из времени, за которое пар доходит до этого участка, и времени, за которое пар прогреет стенку рукава на всю глубину до критической температуры. Если учесть, что скорость конвективного переноса тепла V намного выше скорости прогрева стенки рукава, можно счи-

тать, что через время $t=L/v$ рукав начинает прогреваться по всей длине. В некоторый промежуточный момент времени рассматриваемая система имеет вид, изображенный на рисунке 2.

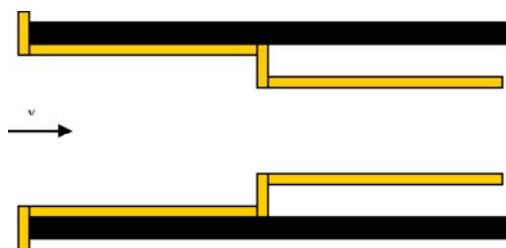


Рис. 2 – Участок рукава в стальной трубе в промежуточный момент времени

Если предполагать, что полимерный рукав при нагреве увеличивается постепенно и равномерно, то в промежуточный момент времени рассматриваемая система имеет вид, изображенный на рисунке 3.

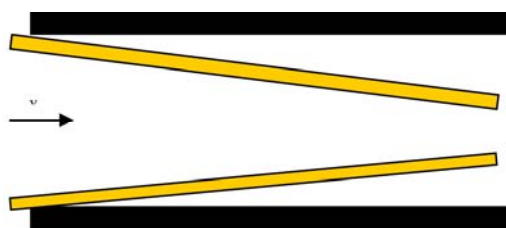


Рис. 3 – Участок рукава в стальной трубе в промежуточный момент времени

Система уравнений, описывающая теплоперенос в одномерном случае, имеет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$S + D \frac{\partial T}{\partial x} - vE = 0.$$

Здесь

T – температура,
 E – энергия, $E=cT$,
 c – удельная теплоемкость вещества,
 v – скорость вещества,
 D – коэффициент теплопроводности,
 S – массовый поток.

Для проверки времени прогрева стенки полиэтиленовой трубы была взята модельная задача с постоянным граничным условием первого рода на левой границе:

$$T(t,0)=T_{gr}.$$

В начальный момент $t=0$ задавалось:

$$T(x,0)=T_0.$$

При постоянном коэффициенте теплопроводности и постоянной скорости потока уравнение теплопереноса можно записать в виде

$$c \frac{\partial T}{\partial t} + cv \frac{\partial T}{\partial x} - D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0.$$

Это уравнение имеет точное решение

$$T(t,x) = 0.5T_{gr} \left(\operatorname{erfc} \frac{x-vt}{2\sqrt{Dc^{-1}t}} + e^{\frac{cvx}{D}} \operatorname{erfc} \frac{x+vt}{2\sqrt{Dc^{-1}t}} \right) + T_0, \quad (2)$$

где $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности (функция ошибки), $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ – дополнительный интеграл вероятности.

Интеграл вероятности находим либо по табулированным таблицам, либо по приближенным формулам.

При малых значениях z :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2z}{\sqrt{\pi}} \left[1 - \frac{z^2}{1! \cdot 3} + \frac{z^4}{2! \cdot 5} - \frac{z^6}{3! \cdot 7} + \dots \right].$$

При больших значениях z :

$$\operatorname{erf}(z) \approx 1 - \frac{e^{-z^2}}{z\sqrt{\pi}} \left[1 - \frac{1}{2z^2} + \frac{1 \cdot 3}{2^2 z^4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2^3 z^6} + \dots \right] \quad \text{передача}$$

тепла в конкретном полимере может быть адекватно описана только при правильном задании теплоемкости и коэффициента теплопроводности. Проблема нахождения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости довольно сложна. Математические закономерности для получения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости в общем случае не получены [1]. Теплоемкость характеризует интенсивность изменения температуры при его нагревании или охлаждении. Данные об удельной теплоемкости позволяют рассчитать степень кристалличности полимера и влияние на нее различных факторов. Многочисленные исследования теплоемкости низкомолекулярных веществ [2] свидетельствуют о том, что теплоемкость является величиной, чувствительной к характеру связей между атомами и молекулами в полимерах и специфики колебаний, образуемых ими структур. Это, прежде всего, проявляется в температурной зависимости теплоемкости. В области температур, где межцепным взаимодействием можно пренебречь, справедлива линейная зависимость теплоемкости от температуры. Линейная зависимость теплоемкости от температуры оказывается результатом наложения нелинейных изменяющихся с температурой вкладов от составляющих низкочастотного колебательного спектра макромолекулы.

По способности проводить тепло полимеры относятся к теплоизоляционным материалам, поскольку они обладают очень низкой теплопроводностью [2]. Математической формулы для определения коэффициента теплопроводности в полимерах нет. Поэтому обычно его определяют экспериментально. Экспериментальные методы определения теплопроводности можно разделить на 2 большие группы. К первой из них относятся методы, основанные на использовании закономерностей стационарного теплового потока, а ко второй – нестационарного. Сущность стационарных методов измерения теплопроводности состоит в том, что в исследуемом образце создается стационарный температурный поле, которое поддерживается за счет подвода и отвода тепла. В нестационарных методах измерения теплопроводности создается нестационарное температурное поле, которое развивается во времени. В этом случае для определения теплопроводности необходимо знать зависимость температуры от времени и координаты.

дуемом образце поддерживается такой тепловой режим, когда распределение температуры в образце по времени не изменяется. Измеряя тепловой поток и разности температур между определяющими точками образца, можно рассчитать его теплопроводность. Теплопроводность исследуемого объекта можно определять по данным теплопроводности некоторого эталона, для которого известна температурная зависимость теплопроводности [1]. К основным недостаткам метода относится длительность установления стационарного теплового потока, особенно для образцов с низкой теплопроводностью, какими являются полимеры. Имеются и другие экспериментальные затруднения, связанные с необходимостью устранения утечек тепла, с осуществлением полного и равномерного контакта между образцом и нагревателем или эталоном и др. Методы нестационарного теплового потока имеют то преимущество, что в одном опыте одновременно могут быть определены обе теплофизические характеристики – теплоемкость и теплопроводность.

Изменение коэффициента теплопроводности аморфных полимеров в диапазоне температур от -180°C до 160°C исследовано достаточно хорошо (обычно он монотонно возрастает от 0.01 до 0.171 ккал/(м·час·град)) [2]. Характерным для температурной зависимости теплопроводности аморфных полимеров является наличие максимума при температуре стеклования. Ниже температуры стеклования теплопроводность практически постоянна или увеличивается с ростом температуры, а выше температуры стеклования – понижается.

Рассмотрим следующие параметры модельной системы, взятой для проведения предварительных расчетов.

Внутренний диаметр рукава – 30 мм, толщина рукава – 2 мм, внутренний диаметр трубы – 108 мм, длина трубы – 10 м, толщина трубы – 2 мм, коэффициент теплопроводности воздуха – 0.021 ккал/(м·час·град) [1, с.129], коэффициент теплопроводности рукава – 0.01 ккал/(м·час·град) [2, с.474], коэффициент теплопроводности железной трубы – 50 ккал/(кг·град) [1, с.235], теплоемкость воздуха – 0.24 ккал/(кг·град) [1, с.128], теплоемкость полимерного рукава – $c \sim T$ [2, с.175], теплоемкость железной трубы – 0.112 ккал/(кг·град) [1, с.239].

Процесс прогрева терморасширяемого рукава происходит воздушным парогенератором. Предполагаем, что начальная скорость пара в парогенераторе 10 м/мин, начальная температура пара 160°C , теплоемкость полимерного рукава толщиной 2 мм положим постоянной $c=160$ ккал/кг·град, соответствующей максимальной температуре в рукаве, коэффициент теплопроводности полимерного рукава положим равным 0.01 ккал/(м·час·град). Предполагаем, что при прогреве до температуры $T=80^{\circ}\text{C}$ рукав восстанавливается до первоначального размера. Начальная температура $T_0=20^{\circ}\text{C}$. В этом случае можно оценить время прогрева стенки рукава. Из формулы (2) при $v=0$ (конвективный перенос в пластике отсутствует) получаем:

$$T(t, x) = 0.5 T_{\text{гр}} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dc^{-1}t}} + T_0. \quad (3)$$

При $T=80$ из этого уравнения вытекает соотношение $80^{\circ} = \frac{160^{\circ}}{2} \operatorname{erfc} \frac{0.002}{2\sqrt{\frac{0.01}{160}t}} + 20^{\circ}$.

Отсюда, используя таблицы для интеграла вероятности, получаем $t_2 \sim 9.4$, т.е. пар прогревает стенку рукава на всю глубину до температуры 80°C примерно за 9 минут. Пар проходит участок 10 метров за $t_1=L/v=1$ мин. Общее время восстановления участка рукава длиной в 10 метров составляет примерно 10 минут.

При линейной зависимости теплоемкости $c=T$ и коэффициента теплопроводности $D=D_0T$ от температуры уравнение теплопереноса можно записать в виде

$$\frac{\partial T^2}{\partial t} + v \frac{\partial T^2}{\partial x} - \frac{D_0}{2} \frac{\partial^2 T^2}{\partial x^2} = 0.$$

Здесь D_0 – коэффициент пропорциональности.

Это уравнение имеет точное решение

$$T(t, x) = T_{\text{гр}} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \frac{x-vt}{\sqrt{2D_0t}} + e^{\frac{2xv}{D_0}} \operatorname{erfc} \frac{x+vt}{\sqrt{2D_0t}} \right)} + T_0. \quad (4)$$

При $D_0=0.0000003$ ккал/м·час·град², $T_0=20^{\circ}$, $T=80^{\circ}$, $T_{\text{гр}}=160^{\circ}$, $v=10$ м/мин получаем время прогрева стенки рукава из уравнения

$$80^{\circ} = 160^{\circ} \sqrt{\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{0.002}{\sqrt{0.00004t}}} + 20^{\circ}.$$

Отсюда, используя таблицы для интеграла вероятности, получаем $t_2 \sim 0.1$ час, т.е. пар прогревает стенку рукава на всю глубину до температуры 80°C примерно за 6 минут. Пар проходит участок 10 метров за $t_1=L/v=1$ мин. Общее время восстановления участка рукава длиной в 10 метров составляет примерно 7 минут. Аналогично получаем общее время восстановления участка рукава длиной, например в 200 метров. Оно составляет примерно $t=t_1+t_2=26$ минут.

Из аналитических оценок видно, что рукав восстанавливается достаточно быстро, хотя результаты расчетов в зависимости от способа моделирования коэффициентов теплоемкости и теплопроводности могут отличаться довольно существенно.

При более сложной (нелинейной) зависимости коэффициентов теплоемкости и теплопроводности уже не удастся найти аналитическую зависимость от времени и пространства. Для расчетов с нелинейной зависимостью коэффициентов теплоемкости и теплопроводности была написана численная программа, по которой начали проводить исследовательские расчеты времени прогрева стенки рукава.

При нелинейных коэффициентах теплоемкости, теплопроводности и постоянной скорости потока уравнение теплопереноса можно записать в виде

$$\frac{\partial [c(T)T]}{\partial t} + v \frac{\partial [c(T)T]}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[D(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0.$$

Общий вид параметров рассматриваемой системы в начальный момент времени приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Схема рассматриваемой системы

железо $c=0.112$, $D=50$, $v=0$, $r=0.002$, $T=20^0$
воздух $c=0.24$, $D=0.021$, $v=0$, $r=0.037$, $T=20^0$
полимер $c=160$, $D=0.01$, $v=0$, $r=0.002$, $T=20^0$
воздух $c=0.24$, $D=0.021$, $v=600$, $r=0.030$, $T=20^0$
полимер $c=160$, $D=0.01$, $v=0$, $r=0.002$, $T=20^0$
воздух $c=0.24$, $D=0.021$, $v=0$, $r=0.037$, $T=20^0$
железо $c=0.112$, $D=50$, $v=0$, $r=0.002$, $T=20^0$

Общий вид распределения температуры на конечный момент времени в рассматриваемой системе изображен на рисунке 5. Здесь красным цветом изображена область, нагретая паром до 160^0C , синим – внешняя граница стенки трубопровода с температурой 20^0C . Остальные цвета показывают поле температур в трубе и пластиковом рукаве, где температура меняется от 20^0C до 160^0C .



Рис. 4 – Поле температур в системе на конечный момент времени

Полученные аналитические зависимости позволяют получить расчётные значения основных параметров процесса терморасширения полимерного рукава при его прогреве, что, в свою очередь, позволяет производить подбор соответствующего технологического оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы» (мероприятие 2.6 Проведение опытно-конструкторских и опытно-технологических работ по тематике, предлагаемой бизнес-сообществом), государственный контракт № 16.526.12.6011.

Литература

1. Краткий физико-технический справочник / Под редакцией Яковлева. – М.: Фитматгиз, 1962. – Т.3.
2. Успехи химии и физики полимеров. – М.: Химия, 1970.

© Д. В. Алявин – научн. консультант ООО «ОЗЭУ», г. Озерск; А. А. Шестаков – канд. физ.-мат. наук, руководитель сектора ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ, г. Снежинск, reline@polymerpro.ru; О. В. Стоянов – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии пластических масс КНИТУ, ov_stoyanov@mail.ru.