

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 536.24

Видин Ю.В., Иванов Д.И., Федоров Г.В., Федюкович А.К.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ СТЕНКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

С использованием широкоизвестных аналитических зависимостей для прямолинейных цилиндрических систем получены соотношения к расчету теплопередачи криволинейных (тороидальных) участков, позволяющие с высокой степенью точности оценить тепловые потери с учетом геометрических особенностей рассматриваемых участков трубопроводов.

Ключевые слова: тепловая изоляция, энергосбережение, стационарный теплообмен, криволинейные поверхности.

Relationships for calculation of heat transfer for the curvilinear (toroidal) sites are obtained using the well-known analytical dependences for straight cylindrical systems, allowing to estimate with high accuracy the thermal losses taking into account geometric features considered pipeline sections.

Keywords: thermal insulation, energy efficient, stationary heat transfer, curved surfaces.

Криволинейные участки являются неотъемлемыми элементами современных трубопроводов тепловых сетей. В общей протяженности тепловых сетей суммарная доля непрямолинейных участков может составлять значительную величину. Наиболее распространенным из таких элементов выступают повороты, в частности П-образные компенсаторы. С геометрической точки зрения их можно рассматривать как некоторые части тора.

На рис. 1 изображена поверхность тороидального трубопровода с нанесенной на неё тепловой изоляцией, причем она является коаксиальной. Изоляция в общем случае может быть неоднородной.

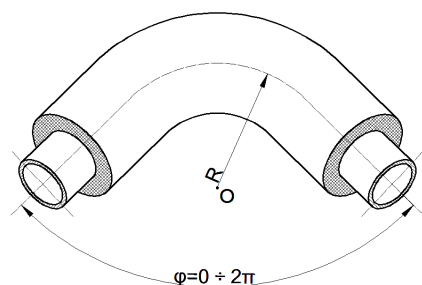


Рис. 1. Поверхность тороидального трубопровода с нанесенной на неё тепловой изоляцией

При аналитическом исследовании процессов теплопередачи через многослойные стенки прямолинейных трубопроводов используется математическая модель, записанная в цилиндрической системе координат [1, 2]. Если же рассматривать фасонный участок трубопровода, изображенный на рис. 1, то необходимо применить тороидальные координаты [3, 4], которые в частном случае вырождаются в цилиндрические, когда $R \rightarrow \infty$ (рис. 2).

В математическом отношении тороидальные координаты существенно сложнее прямоугольных и цилиндрических.

Оператор Лапласа в тороидальной системе координат может быть записан в виде [5-7]

$$\Delta u = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\text{sh} \alpha}{\text{ch} \alpha - \cos \beta} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{\text{sh} \alpha}{\text{ch} \alpha - \cos \beta} \frac{\partial u}{\partial \beta} \right) + \frac{1}{(\text{ch} \alpha - \cos \beta) \text{sh} \alpha} \frac{\partial^2 u}{\partial \phi^2}.$$

Следовательно, строгое решение представленной задачи оказывается громоздким и его будет затруднительно использовать в технических расчетах.

В этой связи для получения инженерного решения сформулированной задачи был предложен приближенный метод. Согласно ему расчет теплового потока через стенку фасонной части трубопровода осуществляется по зависимостям, справедливым для цилиндрической многослойной стенки [2], т.е. фасонный участок условно заменяется эквивалентным отрезком прямого трубопровода.

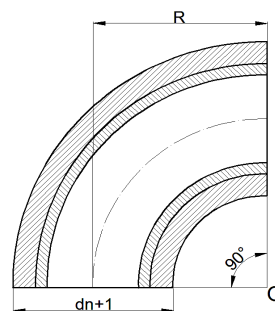


Рис. 2. Схематичное изображение теплоизолированного участка $\phi = \pi/2$ с внешним диаметром d_{n+1}

Тогда искомый тепловой поток Q (Вт) можно приближенно определить по выражению

$$Q = \pi k_l (t_{ж1} - t_{ж2}) L, \quad (1)$$

где $t_{ж1}, t_{ж2}$ – температуры теплоносителя внутри и снаружи криволинейного трубопровода, °С; k_l – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/м·К; L – условная длина эквивалентного участка, м.

Коэффициент k_l находится по широко известному соотношению

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}, \quad (2)$$

где n – число слоев; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях системы, Вт/м²·К; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, Вт/м·К; d_{n+1} – наружный диаметр многослойного тороидального участка, м.

Условную длину L находим из равенства объемов фасонного и замещающего его отрезка цилиндрического участка, т.е.

$$L = \frac{4V}{\pi d_{n+1}^2}, \quad (3)$$

$$V = \frac{\pi d_{n+1}^2}{4} \varphi R. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим

$$L = \varphi R, \quad (5)$$

где φ – угол раскрытия поворота трубы в радианах.

Чаще всего в реальных тепловых сетях $\varphi = \pi/2$.

При соблюдении требования (3) одновременно выполняется условие равенства боковой поверхности теплообмена реального поворотного участка и замещающей его цилиндрической части.

Общий тепловой поток Q распределяется на две неравные части Q_1 и Q_2 , где Q_1 – тепло, отдаваемое с внешней (выпуклой) стороны участка, а Q_2 – тепло, отдаваемое с внутренней (вогнутой) поверхности. Таким образом, можно записать

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (6)$$

Соотношение между этими составляющими будет равно

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{S_2}{S_1}, \quad (7)$$

где S_1 и S_2 – площади наружных теплоотдающих тороидальных поверхностей с внешней и внутренней сторон криволинейного участка соответственно, м².

Для тороидального тела эти площади приблизительно равны [3]

$$S_1 = \varphi(R + 0,2d_{n+1}) \frac{\pi d_{n+1}}{2}; \quad S_2 = \varphi(R - 0,2d_{n+1}) \frac{\pi d_{n+1}}{2}. \quad (8)$$

Очевидно, суммарная площадь составит

$$S = S_1 + S_2 = \varphi \pi R d_{n+1}. \quad (9)$$

Из (6), (7) и (9) следует, что

$$\frac{Q_1}{Q} = 0,5 \left(1 + 0,2 \frac{d_{n+1}}{R} \right), \quad (10)$$

$$\frac{Q_2}{Q} = 0,5 \left(1 - 0,2 \frac{d_{n+1}}{R} \right). \quad (11)$$

Тогда отношение составляющих суммарного теплового потока будет равно

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1 - 0,2 \frac{d_{n+1}}{R}}{1 + 0,2 \frac{d_{n+1}}{R}}. \quad (12)$$

Очевидно, что для прямолинейного трубопровода это отношение равно единице.

Таким образом, наибольшая часть тепловых потерь имеет место с выпуклой стороны тороидального участка трубопровода. Согласно формуле (12) при некоторых соотношениях между d_{n+1} и R значение Q_2/Q_1 может оказаться существенно меньше единицы. В этом случае основное внимание должно быть уделено повышению эффективности тепловой изоляции со стороны выпуклой тороидальной части трубопровода. С этой целью целесообразно произвести перераспределение изоляционного материала в эту сторону, т.е. увеличить толщину изоляционного слоя с внешней стороны за счет её уменьшения на внутренней. Такое техническое решение было предложено в изобретении [4]. Очевидно, что в таком случае система будет представлять собой дезаксиальный тороидальный элемент [8].

Нетрудно показать, что при увеличении радиуса кривизны R рекомендуемые зависимости преобразуются в выражения, справедливые для прямолинейной многослойной цилиндрической конструкции трубопровода.

Выводы

Предложен приближенный аналитический метод расчета процессов теплопередачи через многослойные стенки криволинейных участков трубопроводов. Изложенный способ является весьма простым в математическом отношении и обладает приемлемой точностью.

Список литературы

- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 486 с.
- Видин Ю.В., Журавлев В.М., Колосов В.В. Теоретические основы теплотехники. Теплообмен. Красноярск: КГТУ, 2005. 344 с.
- Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1965. 608 с.
- Пат. 111243 Российская Федерация, МПК F16L59/16. Теплоизолирующее фасонное изделие / Д.И. Иванов, Ю.В. Видин, Ж.Л. Евтихов, А.К. Федюкович; заявитель и патентообладатель Д.И. Иванов. 2011127734/06; заявл. 06.07.2011; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. 2 с.
- Корн Г., Корн Н. Справочник по математике. М.: Наука, 1974. 532 с.
- Лебедев Н.Н., Скальская И.П., Уфлянд Я.С. Сборник задач по математической физике. М.: Гостехтеориздат. 1955. 420 с.
- Хэппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.
- Иванов Д.И., Видин Ю.В. Оптимизация тепловой изоляции фасонного изделия // Сб. трудов Всерос. науч.-практ. конференции «Теплофизические основы энергетических технологий». Томск, 2011.

Bibliography

- Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. The heat transfer. M.: Energy, 1975. 486 p.
- Vidin Y.V., Juravlev V.M., Kolosov V.V. Theoretical fundamentals of heat engineering. Heat-mass-exchange. Krasnoyarsk: KSTU, 2005. 344 p.
- Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of technical universities. M.: Science, 1965. 608 p.
- Pat. 111243 Российская Федерация, МПК F16L59/16. Thermal insulating fitting / D.I. Ivanov, Y.V. Vidin, G.L. Evtihov, A.K. Fedukovich; the applicant and the patentee D.I. Ivanov. 2011127734/06; sub. 06.07.2011; publ. 10.12.2011, Bul. № 34. 2 p.
- Korn G., Korn N. Handbook on mathematics. M.: Science, 1974. 532 p.
- Lebedev N.N., Skalskaya I.P., Uflyand Y.S. Collection of tasks on mathematical physics. M.: State publishing house of technical and theoretical literature, 1955. 420 p.
- Happel G., Brenner G. Hydrodynamics at low Reynolds numbers. M: World, 1976. 630 p.
- Ivanov D.I., Vidin Y.V. Optimization of thermal insulation of the fitting // Collection of papers of the all-Russian scientific-practical conference «Thermophysical fundamentals of energy technologies». Tomsk, 2011.