

В.В.ПШЕНИН, студент, *vladimirspmi@mail.ru*
А.А.КОРШАК, д-р техн. наук, профессор, *korshak-spb@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.V.PSHENIN, student, *vladimirspmi@mail.ru*
A.A.KORSHAK, Dr. in eng. sc., professor, *korshak-spb@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

НОВЫЕ КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛА НУССЕЛЬТА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ТРУБАХ

В результате анализа и математической обработки формул академика Михеева были получены новые критериальные уравнения для числа Нуссельта при вынужденной конвекции в трубах. При использовании полученных формул в ходе теплового расчета трубопроводов отпадает необходимость в итерационном методе решения, поскольку в них не содержится температура стенки трубы. Также были получены формулы для теплоотдачи при смешанном режиме течения, расчет которой до данного момента представлял известную сложность.

Ключевые слова: тепловой расчет трубопроводов, критериальные уравнения, теплоотдача, число Нуссельта, вынужденная конвекция в трубах.

NEW FOR CRITERIAL EQUATIONS NUSSELT NUMBER FORCED CONVECTION IN PIPES

As a result of analysis Miheev's correlation equations for Nusselt number calculation in case of forced convection in pipes, with the help of multiply linear and non-linear regression and statistical analysis, new correlations are suggested. Using new correlations in heat transfer calculation, there is no need in iteration solver. The equations for transition flow regime were formulated. This makes it possible to take account of transition flow regime in heat transfer and hydraulic calculations.

Key words: pipelines heat transfer calculation, dimensionless equations, heat transfer, Nusselt number, forced convection in pipes.

В отечественной практике при расчете коэффициента внутренней теплоотдачи при вынужденной конвекции в трубах принято пользоваться формулами Михеева, поскольку исследования, выполненные во Всесоюзном НИИ по сбору, подготовке и транспорту нефти и нефтепродуктов (ныне Институт проблем транспорта энергоресурсов), показали, что они достаточно хорошо согласуются с опытными данными.* Основной практической

проблемой использования формул Михеева является то обстоятельство, что температура стенки не является изначально известной величиной, ее приходится определять при помощи многократных итераций, используя уравнение теплового баланса. Кроме того, значительные сложности возникают при расчете внутреннего коэффициента теплоотдачи в области смешанного режима течения, поскольку в этом случае необходимо пользоваться интерполяцией.**

* Агапкин В.М. Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов / В.М.Агапкин, Б.Л.Кривошеин, В.А.Юфин. М., 1981. 256 с.

Agapkin V.M., Krivoshein B.L., Yufin V.A. Heat transfer and hydraulic calculations for oil and oil products pipelines. Moscow, 1981. 256 p.

** Михеев М.А. Основы теплопередачи. М., 1956. 392 с.

Miheev M.A. Introduction in heat transfer/ Moscow, 1956. 392 p.

Для того чтобы получить новые критериальные уравнения, необходимо иметь массив данных, состоящий из «эталонных» значений чисел Нуссельта, вычисленных по формулам Михеева, а также массив данных из соответствующих значений безразмерных параметров подобия, через которые мы желаем выразить число Нуссельта. Такие массивы данных были получены при помощи специально составленных в математическом пакете Maple 13 программ. В результате обработки массива эталонных данных при помощи регрессионных методов получены новые зависимости, протестированные при помощи стандартных методов статистики: проверка по *F*-критерию Фишера, определение значимости коэффициентов регрессии при помощи *t*-критерия Стьюдента, построение корреляционной матрицы (которая показала практически полное отсутствие мультикорреляции предикторов), анализ остатков.

В качестве новых безразмерных параметров подобия предлагается использовать следующие величины:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= vD/\nu; \quad \text{Pr}_{\text{cp}} = \nu/\alpha = \nu\rho C_p/\lambda_{\text{h}}; \\ \text{Gr}_{\text{окр}} &= \frac{D^3 g \beta_t (T_f - T_0)}{\nu^2}; \\ \theta_{\text{внеш}} &= \frac{d}{\left(As + \frac{1}{\alpha_2} \right) \lambda_{\text{h(окр)}}}; \\ As &= \sum_{i=1}^n \frac{D}{2\lambda_i} \ln \left(\frac{D_{i+1}}{D_i} \right), \end{aligned}$$

где Re – число Рейнольдса; v – средняя скорость потока; ν – кинематическая вязкость нефти; T_f – температура потока; D – внутренний диаметр трубопровода; ρ – плотность нефти; λ_{h} – коэффициент теплопроводности нефти; β_t – коэффициент температурного расширения нефти; α – коэффициент температуропроводности; Pr_{cp} – число Прандтля, рассчитанное для температуры $T_{\text{cp}} = T_f + T_0/2$; $\theta_{\text{внеш}}$ – безразмерный параметр, характеризующий внешнюю теплоотдачу от трубопровода; $\lambda_{\text{h(окр)}}$ – коэффициент теплопроводности нефти при температуре окружающей среды T_0 ; $\text{Gr}_{\text{окр}}$ – число Грас-

гофа, в котором температура стенки в нем заменена на температуру окружающей среды; As – величина, характеризующая сумму термических сопротивлений изоляции, стенки трубы, отложений; λ_i – величина коэффициента теплопроводности i -го слоя; α_2 – коэффициент внешней теплоотдачи.

Новые критериальные уравнения для определения числа Нуссельта в случае трубопроводов без специальной тепловой изоляции ($As = 0$) для различных режимов движения жидкости имеют вид:

- для турбулентного режима ($\text{Re} > 10000$; $0,5 < \alpha_2 < 10$)

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 0,0176 (\text{Re}_f)^{0,816} (\text{Pr}_f)^{0,449} \times \\ &\times (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,01} (\theta_{\text{внеш}})^{-0,0178}; \end{aligned}$$

- для ламинарного режима ($\text{Re} < 2000$) при $0,5 < \alpha_2 < 5$ и $5 < \alpha_2 < 10$ соответственно

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 0,1876 (\text{Re}_f)^{0,305} (\text{Pr}_f)^{0,42} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,0916} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,024} (\theta_{\text{внеш}})^{-0,076}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 0,1657 (\text{Re}_f)^{0,316} (\text{Pr}_f)^{0,476} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,0949} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,067} (\theta_{\text{внеш}})^{-0,044}; \end{aligned}$$

- для смешанного режима при $5000 < \text{Re} < 10000$ для $0,5 < \alpha_2 < 5$ и $5 < \alpha_2 < 10$ соответственно

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 5,89 \cdot 10^{-5} (\text{Re}_f)^{1,407} (\text{Pr}_f)^{0,438} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,018} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,0123} (\theta_{\text{внеш}})^{0,047}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 8,2 \cdot 10^{-5} (\text{Re}_f)^{1,367} (\text{Pr}_f)^{0,485} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,02} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,0403} (\theta_{\text{внеш}})^{-0,033}; \end{aligned}$$

- при $2000 < \text{Re} < 5000$ для $0,5 < \alpha_2 < 5$ и $5 < \alpha_2 < 10$ соответственно

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 0,00685 (\text{Re}_f)^{0,766} (\text{Pr}_f)^{0,428} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,0695} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,021} (\theta_{\text{внеш}})^{0,05}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_f &= 0,00946 (\text{Re}_f)^{0,72} (\text{Pr}_f)^{0,485} \times \\ &\times (\text{Gr}_{\text{окр}})^{0,074} (\text{Pr}_{\text{cp}})^{-0,06} (\theta_{\text{внеш}})^{0,0094}. \end{aligned}$$

Для трубопроводов с тепловой изоляцией (при As от 0 до 1) для турбулентного режима ($\text{Re} > 10000$, $0,5 < \alpha_2 < 10$):

$$Nu_f = 0,021(Re_f)^{0,8}(Pr_f)^{0,43}.$$

Комплекс $(Pr_f / Pr_w)^{0,25}$ в формуле Михеева не играет существенной роли в данном случае, это объясняется тем, что температура стенки практически совпадает со средней по сечению температурой потока.

Для ламинарного режима ($Re < 2000$)

$$Nu_f = 0,18(Re_f)^{0,305}(Pr_f)^{0,42} \times \\ \times (Gr_{окр})^{0,0931}(Pr_{cp})^{-0,0218}(\theta_{внеш})^{-0,071};$$

для смешанного режима при $5000 < Re < 10000$ и $2000 < Re < 5000$ соответственно

$$Nu_f = 5,15 \cdot 10^{-5}(Re_f)^{1,418}(Pr_f)^{0,438} \times \\ \times (Gr_{окр})^{0,018}(Pr_{cp})^{-0,01}(\theta_{внеш})^{0,00343},$$

$$Nu_f = 5,86 \cdot 10^{-5}(Re_f)^{0,784}(Pr_f)^{0,422} \times \\ \times (Gr_{окр})^{0,07}(Pr_{cp})^{-0,0153}(\theta_{внеш})^{0,05}.$$

Выводы

Полученные критериальные уравнения для расчета внутреннего коэффициента теплоотдачи в отличие от своих аналогов не требуют многократных итераций, поскольку из них исключена температура стенки. В результате разбиения области изменения параметров на отдельные части достигнута высокая точность полученных решений. Кроме того, получены критериальные уравнения для области смешанного режима, расчет которого до этого момента представлял известную сложность.