

**К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ**

**Актуальность проблемы.** К теплофизическим характеристикам теплоносителя, которые оказывают влияние на теплоотдачу, следует отнести плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность, а также с учетом различных условий эксплуатации теплообменного оборудования к перечисленному следует добавить запыленность, наличие капель влаги, частиц льда или снега.

Первые четыре величины учитывают в виде критерия Прандтля, и таким образом число Прандтля является существенной характеристикой теплоносителя с точки зрения особенностей процесса конвективного теплопереноса. В зависимости от его численного значения теплоносители делят на три группы:  $Pr < 1$ ,  $Pr \approx 1$ ,  $Pr > 1$ . К первой группе относятся жидкометаллические теплоносители. Ко вторым – газы при невысоких давлениях и жидкости при высоких температурах. Для них  $0.6 < Pr < 1.0$ . Третью группу образуют капельные жидкости: вода, органические и неорганические жидкости. Некоторые жидкости – вязкие масла, глицерин – при низких температурах имеют числа Прандтля, достигающие нескольких тысяч. Это объясняет главным образом их большой вязкостью, в особенности при низких температурах.

Число Прандтля является важным параметром, характеризующим тепловой пограничный слой, причем как при вынужденной, так и при свободной конвекции. Согласно определению оно представляет собой отношение двух величин, характеризующих свойства, связанные с переносом импульса (вязкость) и переносом теплоты (теплопроводность). Если способность вещества к переносу импульса особенно велика, то влияние стенки, уменьшающее импульс – условия прилипания, также велико, следовательно, это влияние проникает далеко внутрь течения. Иными словами, толщина динамического пограничного слоя получается сравнительно большой. Аналогичное имеет место и для теплового пограничного слоя. Таким образом, при вынужденных конвективных течениях число Прандтля является непосредственной мерой отношения толщин динамического и теплового пограничных слоев.

К настоящему времени проведены многочисленные исследования трения и теплоотдачи для турбулентного движения жидкости в каналах различного профиля и поперечного сечения. Однако лишь немногие работы посвящены исследованиям при хорошо сформулированных условиях.

Большинство экспериментальных данных являются результатами применения методики, разработанной Иглом и Фергюсоном [1] еще более 80-ти лет назад, которая дает экспериментальные значения теплообмена при нулевом тепловом потоке, что физически означает постоянство свойств теплоносителя. Такое допущение часто принимается в теоретических исследованиях. Следующим шагом были работы Спэрроу и Хартнета, выполненные в 50–60-х годах для диапазона числа Прандтля 0.7...100 при турбулентном движении на основе модели с наперед заданным соотношением для коэффициента турбулентной диффузии. В этих работах свойства теплоносителя также принимались постоянными. Далее в работах Алена и Эккерта [2] было показано, что на участке со стабилизировавшимся пограничным слоем при  $Pr=8$  число  $Nu$  изменялось пропорционально числу Рейнольдса, показатель степени которого систематически возрастал 0.84...0.87, в противоположность принятому значению 0.8. Кроме того, отношение числа  $St$  к коэффициенту трения было приблизительно на 30% выше величины  $Pr^{-2/3}$ , причем оно зависело от  $Re$ .

Таким образом, в инженерных расчетах целесообразно устанавливать степень точности вычисляемого по критериальному уравнению коэффициента теплоотдачи в зависимости от теплофизических свойств теплоносителя, которые определяются тепловыми условиями проведения процесса.

Приведенные рассуждения справедливы и для ламинарного пограничного слоя, однако турбулентные пульсации будут разрушать динамический пограничный слой, о чем говорит более заполненный профиль скорости при турбулентном движении.

Ввиду отсутствия возможности проведения большого количества серий экспериментов для выявления влияния числа  $Pr$  на теплоотдачу даже для одной формы каналов было признано целесообразным обобщить опубликованные данные по экспериментальному исследованию теплоотдачи в круглых каналах, полученные Себеси, Кадером и Ягломом, которые проводились в диапазоне чисел Рейнольдса  $10^4...10^5$  и диапазоне чисел Прандтля 0.02...14.3. Отобранные результаты экспериментальных данных обрабатывались с применением критериально-структурного метода [3], в результате чего было получено критериальное уравнение

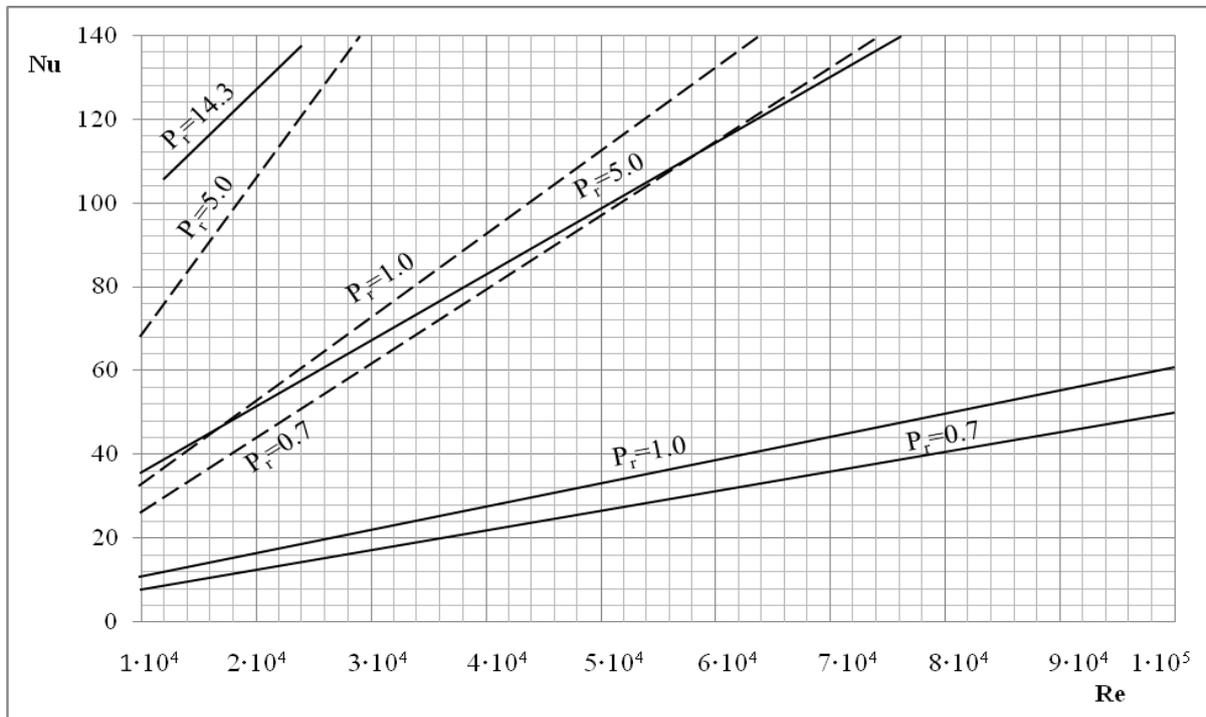
$$Nu=0.018Re^{0.707}Pr^{0.647}, \tag{1}$$

которое отличается от известного и широкого применения уравнения [4]

$$Nu=0.018Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (2)$$

меньшим показателем степени при критерии Рейнольдса, и большим при критерии Прандтля.

Графики функций (1) и (2) от критерия Рейнольдса для различных значений критерия Прандтля представлены на рисунке.



Рисунок

Физическая достоверность полученного уравнения (1) подтверждается проверкой по соотношению толщины теплового и динамического пограничных слоев. Поскольку, как было показано[4]

$$\frac{\delta_T}{\delta_D} \approx \frac{1}{Pr}, \quad (3)$$

то, подставляя в (3) соответствующие значения из (2) и (1) в обоих случаях для воздуха, было получено, что

$$\frac{\delta_T}{\delta_D} \approx 0,5. \quad (4)$$

Практически уравнение (1) показывает, что при Re=idem критерий Nu в большей степени зависит от критерия Прандтля, чем по уравнению (2). Как видно по рисунку выражение (2) дает завышенные значения теплоотдачи при Pr≤1, что будет приводить к отклонению значения температур теплоносителей от ожидаемой. Как правило, для получения требуемой температуры увеличивают поверхность теплообмена, вводя так называемый коэффициент запаса. Здесь следует подчеркнуть, что значение критерия Прандтля 0.7 характерно в широком диапазоне температур для воздуха, углекислого газа, кислорода, водяного пара, азота, гелия, водорода.

С другой стороны данные теплофизических свойств например воды, трансформаторного масла таковы, что в диапазоне температур от 0 до 100°С критерий Прандтля изменяется 13.7...1.75. Поэтому выражение (2) для этих и подобных жидкостей дает результаты с удовлетворительной точностью в интервале температур от 20 до 60°С. В заключение следует отметить, что для трансформаторного масла в

указанном диапазоне температур критерий Прандтля изменяется  $471 \cdot 10^4 \dots 0.84 \cdot 10^2$  и поэтому применение выражения (2) без специальной поправки приводит к существенным ошибкам в тепловых расчетах.

Критически оценивая полученное критериальное уравнение (1), отметим, что оно может применяться для теплоносителей в диапазоне критерия Рейнольдса  $10^4 \dots 10^5$  и при  $Pr \neq 1$  дает удовлетворительные по точности результаты, ошибка которых не превышает 3.5% по сравнению с данными экспериментов перечисленных выше исследователей, что позволяет рекомендовать это уравнение для практических расчетов. Вместе с тем, использование этого выражения  $Pr \geq 20$  требует дополнительных исследований.

**Выводы.** Анализ выражения (1) позволяет сделать вывод о том, что при  $Pr \neq 1$  теплофизические свойства теплоносителя оказывают более существенное влияние на теплоотдачу, чем считалось до настоящего времени.

### Литература

1. A.Eagle, Ferguson, The coefficient of heat transfer from turbo to water. Proc.Inst. Mech. London. vol 2.1930.
2. Ален, Эккерт Измерение коэффициента трения и теплоотдачи при турбулентном движении воды в трубе для постоянного теплового потока на стенке. Труды АОИМ №3, 1964
3. Анипко О.Б. Критериально-структурный метод для описания конвективной теплоотдачи. Зб. наук. прац. Сист. обробки інф. Х. ХВУ. 2000.
4. Себиси, Бредшоу Конвективный теплообмен. М. Мир. 1987. – 592с.

УДК 623.438.32

Аніпко О.Б., Клімов В.Ф., Магерамов Л.К.-А., Колбасов О.М.

### ДО ПИТАННЯ ПРО ОЦІНКУ ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОНОСІЯ НА ТЕПЛОВІДДАЧУ

У статті наведені матеріали щодо оцінки теплофізичних характеристик теплоносія, які оцінюються за комплексними показниками чисел Прандтля та критерія Рейнольдса.

Anipko O.B., Klimov V.F., Mageramov L.K.-A., Kolbasov O.M.

### ON THE PROBLEM OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS INFLUENCE ESTIMATION ON HEAT TRANSFER.

The materials are presented relating to estimation of influence of fluid thermophysical on heat transfer with Prandtl and Reynolds numbers.