

Анипко О.Б., Горбунов К.А.

О ВЛИЯНИИ КРИТЕРИЯ ПРАНДТЛЯ НА ТЕПЛООТДАЧУ

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 Игло и Фергюсоном [1], более 70 лет назад, которая дает экспериментальные значения теплообмена при нулевом тепловом потоке, что физически означает постоянство свойств теплоносителя. Такое допущение часто принимается и в теоретических исследованиях.

Следующим шагом были теоретические исследования Спэрроу и Хартнета, выполненные в 50-е, 60-е годы, в диапазоне $Pr = 0,7 \div 100$ при турбулентном движении на основе модели с использованием наперед заданного соотношения для коэффициента турбулентной диффузии. В этих работах свойства теплоносителя также принимались постоянными.

Далее были работы Аллена и Эккерта [2], в которых показано, что на участке со стабилизировавшимся пограничным слоем при $Pr = 8$ число Nu изменялось пропорционально числу Re , показатель степени которого систематически возрастает от 0,84 до 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 коэффициента теплоотдачи в зависимости от тепло-физических характеристик теплоносителя, которые определяются тепловыми условиями проведения процесса, т.е. зависят от температуры, так как именно они в немалой степени оказывают влияние на теплоотдачу.

Итак, к теплофизическим характеристикам теплоносителя, которые оказывают влияние на теплоотдачу, следует отнести плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность. Также, с учетом условий эксплуатации рассматриваемых типов теплообменных аппаратов (ТА), к вышеперечисленным можно добавить: запыленность, наличие капельной влаги (частиц льда или снега).

Первые четыре характеристики учитывают в виде критерия $Pr = \frac{C\mu}{\lambda}$, и, таким образом, число Pr является существенной характеристикой теплоносителя с точки зрения особенностей процесса конвективного теплообмена.

В зависимости от его численного значения теплоносители можно разделить на три группы: $Pr \ll 1$, $Pr \approx 1$, $Pr > 1$.

К первой группе относятся жидкометаллические теплоносители. Ко второй – 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 Pr , достигающие значений нескольких тысяч. Это объясняется, главным образом, их большой вязкостью.

Число Pr является также важным параметром для температурного пограничного слоя и для теплопередачи, причем и в случае вынужденной конвекции, и в случае свободной. Согласно определению число Pr представляет собой отношение двух величин, характеризующих свойства, связанные с переносом импульса (вязкость) и переносом теплоты (теплопроводность). Если способность вещества к переносу импульса, т.е. вязкость, особенно велика, то влияние стенки, уменьшающее импульс – условие прилипания, также велико. Следовательно, это влияние проникает далеко внутрь течения. Иными словами, толщина динамического пограничного слоя получается сравнительно большой. Аналогичное имеет место и для температурного пограничного слоя (рис. 1). Из вышесказанного вытекает, что при вынужденных конвективных течениях число Pr является непосредственной мерой отношения толщин обоих пограничных слоев.

Эти рассуждения справедливы и для ламинарного пограничного слоя. Однако, турбулентные пульсационные составляющие будут разрушать динамический пограничный слой, о чем говорит более заполненный профиль скорости при турбулентном течении (рис. 2).

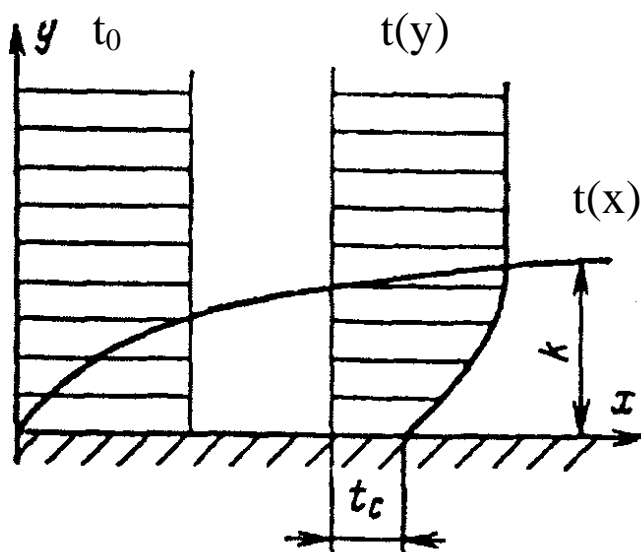


Рисунок 1 – Изменение температуры в гидродинамическом пограничном слое

Для выявления влияния числа Pr на теплоотдачу был применен, разработанный критериально-структурный метод (КСМ) [3–5], для анализа теплообмена в круглой трубе при турбулентном режиме движения в диапазоне значений числа $Re = 10^4 \div 1,2 \cdot 10^5$ и чисел Прандтля $Pr = 1,0 \div 5,0$. В результате было получено критериальное уравнение

$$Nu = 0,018 Re^{0,707} Pr^{0,647}, \quad (1)$$

которое, как видно, отличается от известного и широко применяемого уравнения [6]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (2)$$

меньшими показателями степени при критерии Рейнольдса и большим при критерии Прандтля.

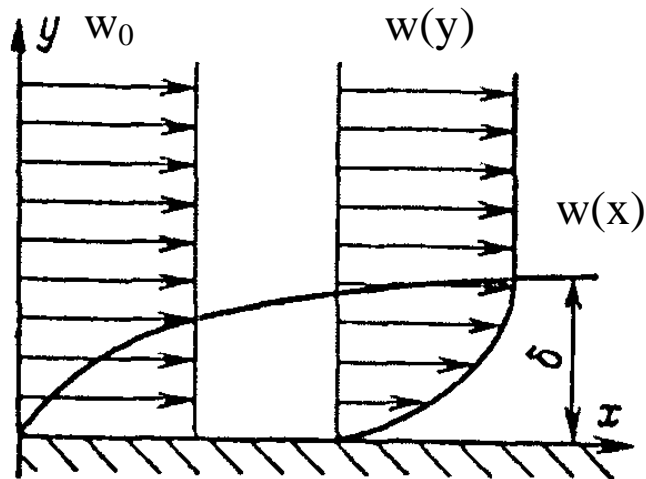


Рисунок 2 – Изменение скорости в гидродинамическом пограничном слое

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

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

то, подставляя в (3) соответствующие значения из (1) и (2), в обоих случаях было получено, что $\frac{\delta_T}{\delta_D} \approx 0.5$.

Практически уравнение (1) показывает, что при $Re = idem$ критерий Nu в большей степени зависит от критерия Pr , чем по уравнению (2), что будет приводить к тому, что (2) при $Pr \approx 1.0$ будет давать заниженные значения коэффициента теплоотдачи, что, в свою очередь, повлечет увеличение материалоемкости ТА, а при $Pr > 2.0$ будет давать завышенные коэффициенты теплоотдачи, что будет приводить к несоответствию температуры теплоносителя на выходе из ТА расчетному значению, что, в конечном счете, также приведет к наращиванию теплообменной поверхности.

Зависимость (1) дает более точные значения Nu при $Pr \neq 1.0$. Данные, полученные по выражению (1), сравнивались с результатами экспериментальных исследований Т. Себиси, Кадера и Яглома [7], которые проводились в диапазоне чисел Прандтля от

0.02 до 14.3 и критическими в том же диапазоне чисел Рейнольдса $10^4 \div 10^5$. Результаты сравнения, представленные на рисунке 3, показали, что для указанных диапазонов чисел P_r и Re уравнение (1) дает практически точные значения для интенсивности теплоотдачи. Ошибка не превышает 3.5 %. Это позволяет рекомендовать (1) для практических расчетов. Здесь необходимо отметить, что точность полученного уравнения при $P_r > 20$ требует дальнейшего экспериментального подтверждения.

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

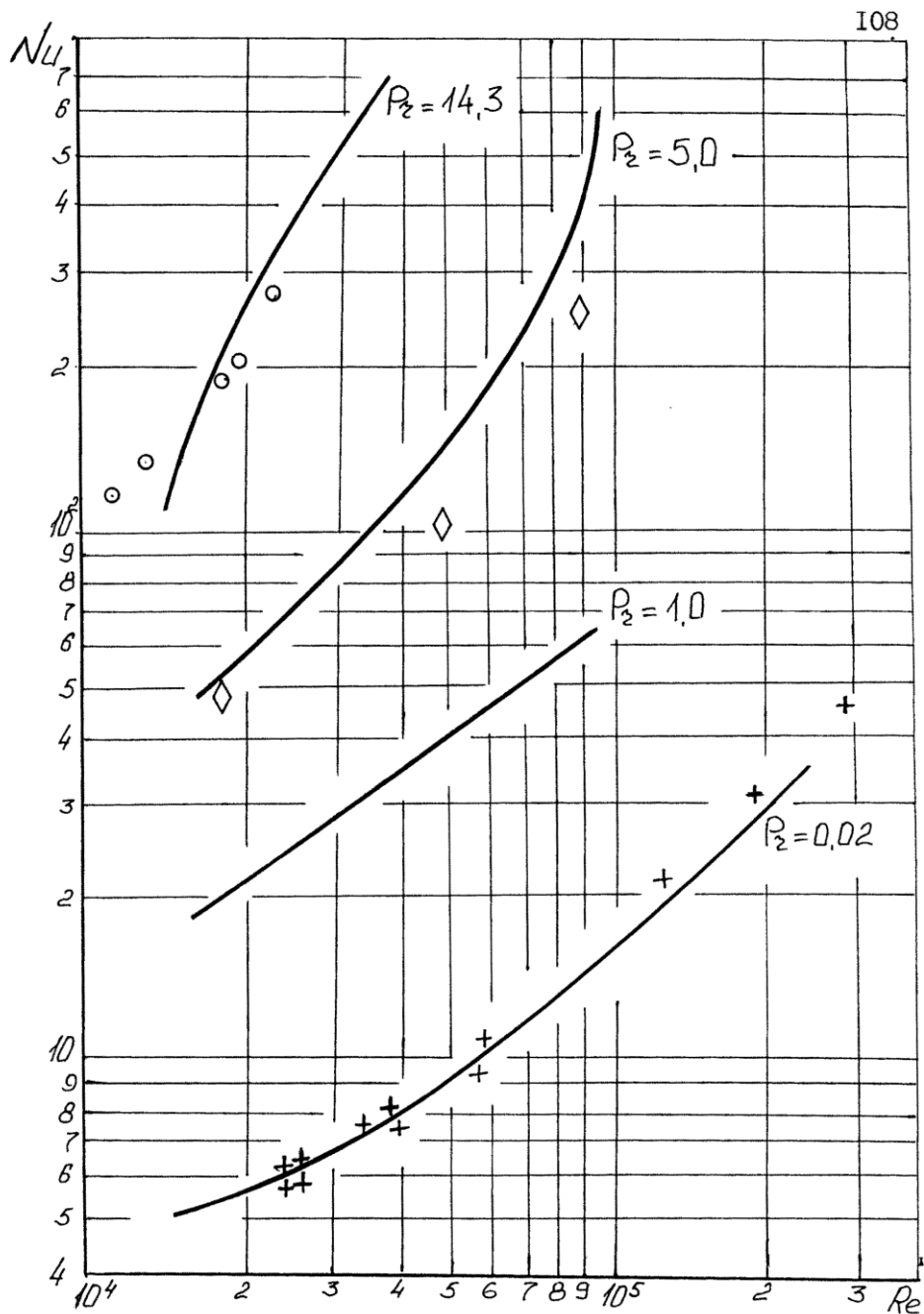


Рисунок 3 – К сравнению теплоотдачи в круглом канале: — по уравнению (1); ○; + – экспериментальные данные Себеси; ◇ – экспериментальные данные Кадер и Яглом
Литература

1. Eagle A., Ferguson R.M., On the coefficient of heat transfer from the internal surface of tube walls, Proc. Roy. Soc. (London) A 127 (1930), pp. 540–555.
2. Аллен, Эккерт Измерение коэффициентов трения и теплоотдачи при турбулентном движении воды в трубе в случае постоянного теплового потока на стенке ТАОУМ №3, 1964.– с. 3–9.
3. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. Харьков: ХВУ.– 1998.– 187 с.
4. Товажнянский Л.Л., Анипко О.Б., Маляренко В.А., Абрамов Ю.А., Кривцова В.И., Капустенко П.А. Основы энерготехнологии в промышленности.– Харьков: НТУ «ХПИ».– 2002.– 436 с.
5. Слесаренко А.П., Анипко О.Б. Прогнозирование надежности систем обеспечения теплового режима функциональных блоков робототехнических комплексов // Тезисы докладов Всесоюзной НТК.– Киев.– 1990.
6. Крэйт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир. 1983.
7. Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен: физические основы и вычислительные методы. М.: Мир, 1987.– 592 с.

УДК 621.165

Аніпко О.Б., Горбунов К.О.

ПРО ВПЛИВ КРИТЕРІЮ ПРАНДТЛЯ НА ТЕПЛОВІДДАЧУ

У роботі отримано критеріальне рівняння, що дозволяє зробити висновок про те, що при $Pr \neq 1$ теплофізичні властивості теплоносія виявляють більш суттєвий вплив на тепловіддачу, чим вважалося дотепер.

Anipko O.B., Gorbunov K.O.

EFFECT OF CRITERIA PRANDTL ON HEAT TRANSFER

In this work criterion equation that leads to the conclusion that for $Pr \neq 1$ thermophysical properties of the heat transfer agent exhibit a significant effect on heat transfer than was thought until now was obtained.