

УДК 536.27:621.1.016

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ТРУБАХ С ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ОКРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ

© Игорь Евгеньевич Лобанов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский Авиационный Институт (Национальный исследовательский университет)" МАИ, Москва, Россия

loobbaannooff@live.ru

Аннотация. В статье проведено математическое моделирование изотермического гидравлического сопротивления при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена для условий плавно очерченных турбулизаторов, показавшее, что увеличение числа Рейнольдса может благоприятно сказываться на интенсификацию теплообмена, а наилучшие эффекты интенсификации теплообмена достигаются при существенном отличии полученных законов от автомодельных. В статье было выявлено, что гидравлическое сопротивление, теоретически рассчитанное по данной модели, отнесённое к гидравлическому сопротивлению для гладкой трубы, рассчитанному по формуле Блазиуса, с ростом числа Рейнольдса снижается. Результаты могут быть использованы для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, моделирование, поток, канал, интенсификация, теплообмен турбулентный, турбулизация; турбулизатор.

THEORETICAL MATHEMATICAL MODELING OF HYDRAULIC RESISTANCE IN PIPES WITH TURBULIZERS OF THE CIRCULAR CROSS SECTION AT THE TURBULENT CURRENT

© Igor E. Lobanov

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

loobbaannooff@live.ru

Annotation. The mathematical modeling of isothermal hydraulic resistance in turbulent flow in canals under conditions of intensification of heat exchange for conditions of smoothly outlined turbulizers was carried out. It showed that an increase in the Reynolds number can favorably affect the intensification of heat transfer, and the best effects of heat exchange intensification are achieved if the laws differ substantially from self-similar ones. In the article it was revealed that the hydraulic resistance, theoretically calculated for this model, referred to the hydraulic resistance for a smooth pipe, calculated by the Blasius formula, decreases with increasing Reynolds number. The results can be used to intensify heat transfer in heat exchangers used in aviation and rocket and space technology.

Key words: hydraulic resistance; modeling; flow; channel; intensification; turbulent heat exchange; turbulence; turbulizer.

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ. В авиационной и ракетно-космической технике находят широкое

применение различные теплообменные аппараты, где, в результате интенсификации теплообмена возможно достижение снижения гидравлических потерь в них, снижения их массогабаритных показателей, расходов и температур используемых теплоносителей. В ряде случаев задачей может являться снижение температурного уровня поверхностей теплообмена при фиксированных режимных и конструктивных характеристиках. Таким образом, необходимо разработка более точных, чем существующие теоретических методов исследования интенсификации теплообмена при турбулентном течении в трубах теплообменных аппаратов.

В существующих работах (например, в [1—5]) утверждалось, что для диафрагм с острой кромкой (при прочих равных условиях) закон сопротивления практически автомоделен, однако, для плавных турбулизаторов коэффициент гидравлического сопротивления может в определённой мере снижаться с увеличением числа Рейнольдса.

Математическое моделирование гидравлического сопротивления при течении в трубах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена трубах с плавными турбулизаторами проводится с использованием четырёхслойной схемы турбулентного потока.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛАХ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ УСЛОВИЙ ПЛАВНО ОЧЕРЧЕННЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ. В работах [1, 2] отмечалось (при прочих равных условиях), что для диафрагм с острой кромкой закон сопротивления практически автомоделен, но для плавно очерченных турбулизаторов коэффициент сопротивления заметно падает с ростом числа Рейнольдса, причём отношение $\xi/\xi_{\text{ГЛ}}$ может убывать.

Вышеуказанный характер изменения коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса благоприятно отражается на интенсификации теплообмена.

В работах [1, 2] также справедливо отмечается, что наилучшие эффекты интенсификации теплообмена достигаются в случаях, где законы гидравлического сопротивления существенно отличаются от автомодельных, например, в [3, 4], хотя в подавляющем большинстве работ, посвящённых интенсификации теплообмена, законы гидравлического сопротивления в исследуемых трубах практически автомодельны.

Следовательно, возникает необходимость не только экспериментального, но и теоретического исследования явления снижения отношения $\xi/\xi_{\text{ГЛ}}$ с ростом числа Рейнольдса для труб с плавно очерченными турбулизаторами.

Моделирование гидравлического сопротивления при течении в каналах теплоносителей с постоянными теплофизическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена трубах с плавно очерченными турбулизаторами проводится на базе использования четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя.

Уравнение для определения сопротивления ξ турбулизированного потока выводится на основе интеграла средней скорости:

$$\bar{w}_x = 2 \int_0^1 w_x R dR, \quad (1)$$

где w_x — аксиальная скорость; x — аксиальная координата; \bar{w}_x — скорость среднерасходная; $R=r/r_0$ — безразмерный (относительный) радиус трубы (r_0 — внутренний радиус трубы; r — радиальная координата).

Интегрирование (1) производится отдельно для каждого из подслоёв.

$$\text{Для вязкого подслоя} \quad \rightarrow R \in \left[1 - \frac{\eta_1}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 \right], \text{ где } \eta_1=5 \rightarrow \frac{w_x}{w_x} = \frac{\xi}{16} \text{Re}(1-R), \quad (2)$$

где $\beta=0,023$ — константа; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления; η — безразмерная координата; Re — число Рейнольдса.

Для промежуточного подслоя — $R \in \left[1 - \frac{\eta_2}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}}; 1 - \frac{\eta_1}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right]$, где $\eta_2=30$ —

$$\frac{w_x}{w_x} = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left[1 + \ln \left(\frac{\eta}{5} \right) \right] = 5 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left\{ 1 + \ln \left(\frac{Re}{5} (1-R) \sqrt{\frac{\xi}{32}} \right) \right\}. \quad (3)$$

Для вихревого ядра во впадине — $R \in \left[1 - \frac{h}{r_0}; 1 - \frac{\eta_2}{Re} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \right]$ —

$$\frac{w_x}{w_x} = \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left\{ 5,5 + 2,5 \ln \left[\frac{r_0}{h} (1-R) \right] \right\}, \quad (4)$$

где h — высота турбулизатора.

Для условий интенсификации теплообмена путём применения труб с плавно очерченными турбулизаторами будет иметь место генерация слоя смешения, что позволяет элиминировать турбулентное ядро потока при расчёте гидравлического сопротивления.

Следовательно, задача об определении гидравлического сопротивления для труб с плавно очерченными турбулизаторами будет сведена к решению трансцендентного уравнения, полученного после проведения интегрирования уравнения (1) с учётом условий (2)—(4).

Численное решение уравнения (1) при учёте условий (2)—(4) для $d/D \approx 0,9$ и $t/D=1,00$ в зависимости от числа Рейнольдса в диапазоне $Re=10^5 \div 10^6$ представлено на рис. 1.

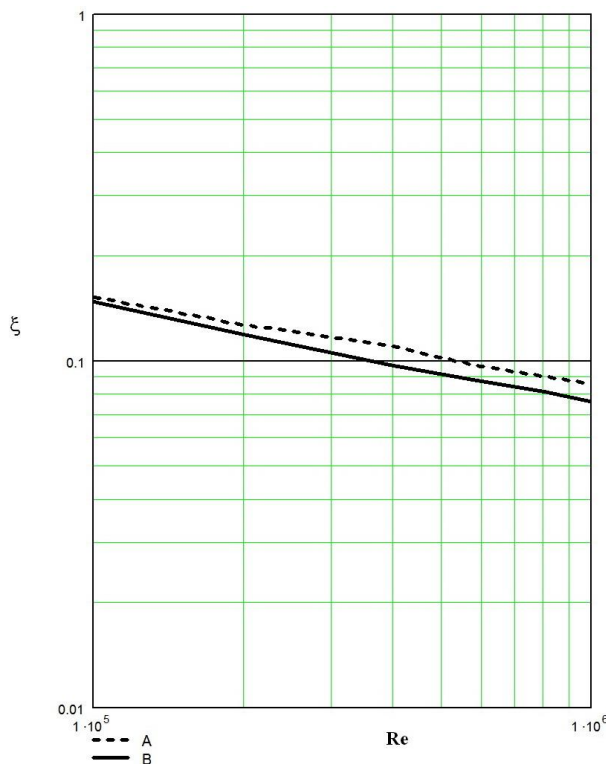


Рис. 1. Расчётные и экспериментальные результаты относительно гидравлического сопротивления для интенсификаторов плавной геометрической формы: А: экспериментальные данные; В: расчётные данные.

На рис. 2 представлены данные по относительному гидравлическому сопротивлению $\xi/\xi_{\text{гл}}$. Там же приведены экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению для различных соответствующих значений режимных параметров и геометрических параметров турбулизаторов [1, 2].

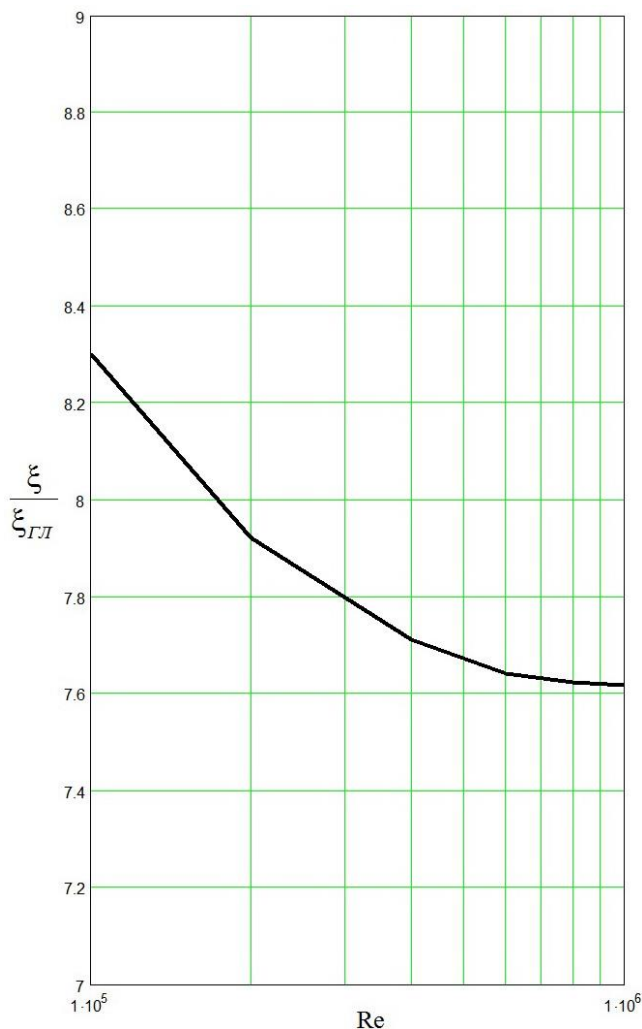


Рис. 2. Теоретические данные расчёта относительного гидравлического сопротивления $\xi/\xi_{\text{гл}}$ для интенсификаторов плавной геометрической формы.

Результаты, приведённые на рис. 1, указывают на то, что теоретическая модель хорошо соответствует экспериментальным данным для соответствующего диапазона геометрических и режимных характеристик соответствующего метода интенсификации теплообмена. Следовательно, адекватность расчётных данных опытным данным можно считать установленной.

На графике, представленном на рис. 2, где приведено отношение гидравлического сопротивления, рассчитанного теоретически по вышеприведённой модели, к гидравлическому сопротивлению гладкой трубы, рассчитанного по формуле Блазиуса, отчётливо видно, что это отношение снижается с ростом числа Рейнольдса.

Следовательно, вышеуказанные данные показывают, что разработанная теоретическая модель адекватно описывает известное явление снижения отношения $\xi/\xi_{\text{гл}}$ с ростом числа Рейнольдса для труб с плавно очерченными турбулизаторами, указанного в работах [1—6], что, в свою очередь, благоприятно сказывается на интенсификации теплообмена, потому что наилучшие эффекты интенсификации теплообмена достигаются именно в случаях, где

законы гидравлического сопротивления существенно отличаются от автомобильных.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. В статье было выявлено, что гидравлическое сопротивление, теоретически рассчитанное по данной модели, отнесённое к гидравлическому сопротивлению для гладкой трубы, рассчитанному по формуле Блазиуса, с ростом числа Рейнольдса снижается.
2. Полученные в статье расчётные данные показали, что сгенерированная теоретическая модель адекватно описывает явление понижения относительного гидравлического сопротивления с увеличением числа Рейнольдса для труб с плавно очерченными турбулизаторами потока, описанное в имеющихся экспериментах, что благоприятно сказывается на интенсификации теплообмена, поскольку улучшение эффекта интенсификации теплообмена достигается в тех случаях, где закон гидравлического сопротивления отличается от автомобильного.
3. Результаты могут быть использованы для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике.

Список литературы

1. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Ярхо С. А. Интенсификация теплообмена в каналах. - М.: Машиностроение, 1990. - 208 с.
2. Эффективные поверхности теплообмена / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, И. З. Копп и др. - М.: Энергоатомиздат, 1998. - 408 с.
3. Dipprey D.F., Sabersky R.H. Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various Prandtl numbers // Jbid. — 1963. — V. 6, № 5. — P. 306—311.
4. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. The experimental study of the heat transfer intensification under conditions of forced flow in channels // Proc. JSME 1967 Semi-International Symposium, 4—8-th September 1967. — V. 1. — Tokyo, 1967. — P. 65—77.
5. Лобанов И. Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: дисс. ... д-ра техн. наук. - М., 2005. - 632 с.
6. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. - М.: Издательство МАИ, 2011. -160 с.

References

1. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in the channels. - M.: Mechanical Engineering, 1972. - 220 p.
2. Effective heat exchange surfaces / E.K. Kalinin, G.A. Dreitzer, I.Z. Kopp et al. - Moscow: Energoatomizdat, 1998. - 408 p.
3. Dipprey D.F., Sabersky R.H. Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various Prandtl numbers // Jbid. - 1963. - V. 6. № 5. - P. 306—311.
4. Kalinin E.K., Dreitzer G.A., Yarkho S.A. The experimental study of the heat transfer intensification under conditions of forced flow in channels // Proc. JSME 1967 Semi-International Symposium, 4—8-th September 1967. V. 1. - Tokyo, 1967. - P. 65—77.
5. Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in canals: diss. ... Dr. techn. sciences. - M., 2005. - 632 p.
6. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Mathematical simulation of intensified heat transfer during flow in channels based on complex models of the turbulent boundary layer. - M.: Publishing house MAI, 2011. - 160 p.

Дата поступления: 8 февраля 2018 г.