Э Н Е Р Г Е Т И К А И Э Л Е К Т Р О Т Е Х Н И К А

EDN ARKIGG
DOI 10.5281/zenodo.19201939
УДК 536.24+532.52

СНИЖЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООТДАЧИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ РЕЗКОМ УВЕЛИЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА

© 2025 ***Володин Ю.Г., Павлыш В.Н.***

В статье приводятся результаты экспериментального исследования трения и теплоотдачи в цилиндрической трубе. Результаты эксперимента показали, что резкое увеличение температуры газового потока способствует формированию тепловой и гидродинамической нестационарности, которые в сочетании с неизотермичностью создают условия, приводящие к снижению эффективности теплоотдачи. Данному процессу способствует динамика процесса нарастания температуры потока, начиная с порога 3000 *К*/с и более.

Ключевые слова: эксперимент, нестационарность, теплоотдача, эффективность теплоотдачи.

Введение. Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса S=2St/C_f, представляющим собой отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту трения. Известно, что, в условиях внутренней задачи, например, при торможении потока теплоотдача увеличивается, а при ускорении наоборот снижается [1]. Иногда снижение теплоотдачи бывает если предсказуемым, то количественно неожиданным как у профессора Дейча М.Е. при исследовании обтекания сферы. Обнаруженное явление было названо «обратным переходом» или «ламинаризацией» турбулентного пограничного слоя [2]. Удовлетворением интереса к этому явлению явился ряд работ [3-6], в которых явление ламинаризации исследовалось в условиях внутренней задачи и было получено при различных видах воздействий – отрицательный продольный градиент давления, отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев стенки канала и др. Из названных работ выделяется [7], в которой экспериментально исследовалась структура динамического и теплового пограничных слоёв. Оказалось, что при проявлении эффекта ламинаризации турбулентного пограничного слоя, последний остается турбулентным, а механизм турбулентного переноса значительно снижается. В результате, более, чем в два раза снижается величина коэффициента теплоотдачи St и нарушается аналогия Рейнольдса.

Эксперимент. Экспериментальные исследования выполнялись на газодинамическом стенде, представляющим собой аэродинамический контур разомкнутого типа с электродуговым подогревом рабочего тела перед входом в экспериментальный канал. Экспериментальный стенд, экспериментальный канал, диагностическое оборудование подробно описаны в предыдущей статье [8].

Результаты исследований. Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области с градиентами температуры 12000 К/с и скорости потока 700 м/с^2 формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 1-2).

С изменением температуры потока изменяются теплофизические свойства рабочего тела такие, как плотность и вязкость, и, следовательно, изменяются параметры пограничных слоёв и течения в целом. В динамическом пограничном слое увеличение температуры потока сопровождается изменением интегральных характеристик [9], а перестройка кинематической структуры приводит к увеличению пристеночных касательных напряжений трения [10]. На рисунке 1 представлен график зависимости коэффициента трения в функции характерного числа Рейнольдса. На графике показана следующая динамика исследуемого процесса: 2500 *К*/с и 150 м/с^2 (точки обозначены ромбом), 6000 *К*/с и 350 м/с^2 (квадрат), 12000 *К*/с и 700 м/с^2 (треугольник).

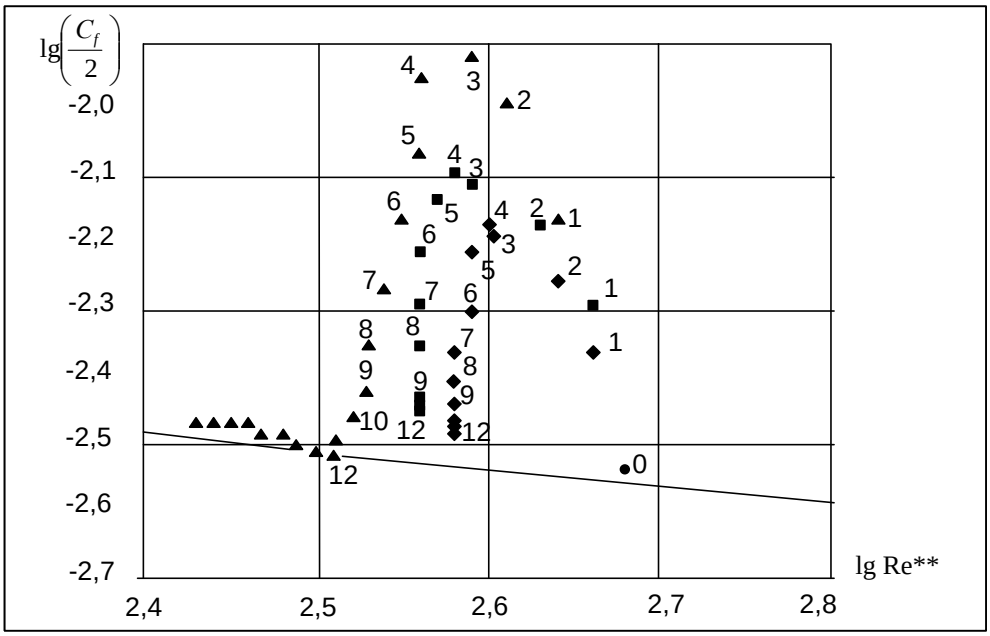

Рис. 1. Зависимость величины коэффициента трения C_f от характерного числа Рейнольдса Re**.
Цифры обозначают время: 1 – 0,01 с; 2 – 0,02 с; 3 – 0,03 с; … 10 – 0,1 с; 12 – 0,12 с

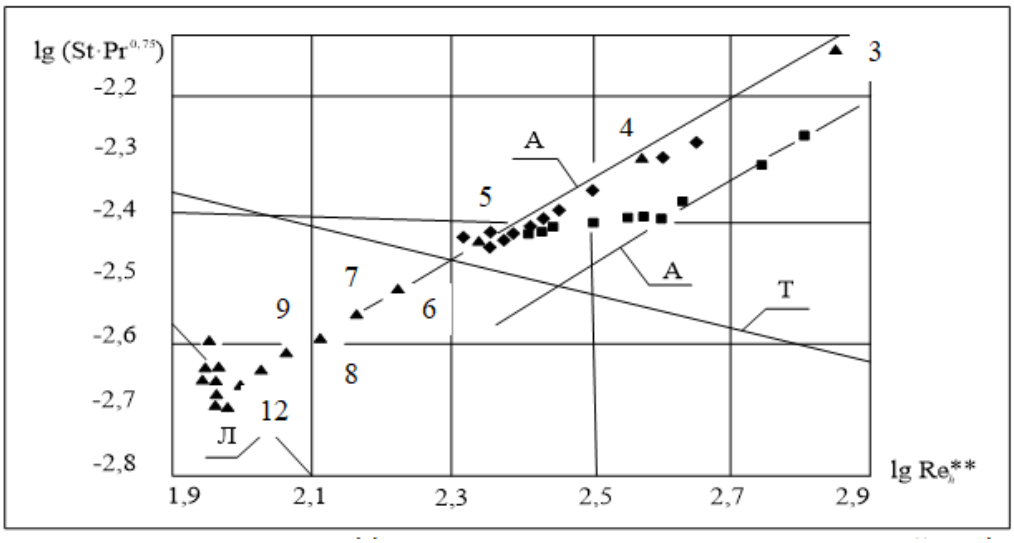

Рис. 2. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи St от числа Рейнольдса Re$_h$**.
Цифры обозначают время: 3 – 0,03 с; 4 – 0,04 с… 12 – 0,12 с.

Увеличение температуры потока и его динамики приводят к большему нарастанию величины коэффициента трения, который определяется по выражению:

$$\frac{C_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho_0 w_0^2}.$$

Массовая скорость в знаменателе величина постоянная по условиям эксперимента. Таким образом, коэффициент трения повторяет характер изменения касательных напряжений трения τ_w, которые измерялись методом «трубка-выступ». В эксперименте, кроме перепадов давления на датчиках «трубка-выступ», измерялось полное давление в форкамере P_0^* и статические давления в каждом контрольном сечении, разность которых равна $\Delta P = \frac{\rho_0 w_0^2}{2}$. К моменту времени 0,12 секунды нестационырный процесс можно считать законченным, поскольку экспериментальные точки группируются около стандартной зависимости для турбулентных режимов течения.

С увеличением температуры потока формируется тепловой пограничный слой. Измеренные в эксперименте температура потока в приосевой области и температура стенки в функции продольной координаты и времени позволили определить параметры теплового пограничного слоя. Увеличение температуры потока сопровождается прогревом пограничного слоя и увеличением температуры стенки канала. Причем, если с начала эксперимента временная производная температуры стенки канала увеличивается, что вполне логично, то начиная с момента времени 0,06 секунды производная имеет постоянную величину, т.е. стенка канала прогревается с постоянной скоростью. Плотность теплового потока, определяемая по выражению:

$$q_w = C_{pw}\rho_w \Delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w,$$

также имеет постоянную величину с момента 0.06 секунды. Здесь Δq_w – потери тепла, обусловленные свободной конвекцией и лучистым теплообменом, ввиду отсутствия теплоизоляции наружной поверхности канала, которые не превысили 5%. Коэффициент теплоотдачи α определялся по закону Ньютона:

$$\alpha = \frac{q_w}{t_0^* - t_w},$$

а характеризующий перенос тепла от газового потока к стенкам канала критерий Стантона выражением:

$$St = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 \left(h_0^* - h_w\right)}. \quad (1)$$

На рисунке 2 кроме экспериментальных точек построены прямые:
Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0{,}0128}{Re_h^{**0{,}25} Pr^{0{,}75}},$$

Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

$$\mathrm{St}_0 = \frac{0{,}22}{\mathrm{Re}_h^{**}\,\mathrm{Pr}^{4/3}},$$

А – аппроксимационное выражение: $\psi_{zh} = \frac{\mathrm{St}}{\mathrm{St}_0} = \frac{1}{w_0^2}\frac{\partial w_0}{\partial t}\sqrt{\frac{1}{\mathrm{Re}_h^{**}}\frac{1}{\Delta h}\frac{d(\Delta h)}{dt}}$.

Отслеживая перемещения экспериментальных точек, удалось определить величину производной температуры потока по времени – около 3000 градусов в секунду. С этого порога начинает снижаться величина коэффициента теплоотдачи ниже стандартного значения при увеличении температуры газового потока и уменьшении числа Re_h^{**}. На графике видно, что экспериментальные точки мигрируют в нижний левый угол и группируются около прямой Л. Данный факт свидетельствует о ламинаризации теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС). Из анализа выражения (1), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи St, следует, что причиной ламинаризации ТПС является неизотермичность (т.к. массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени) и параметром ламинаризации следует определить температурный фактор ψ или температурный напор ΔT. По изменению величины последнего определены границы области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700\ K$ и переходной области от 350 до 700 *К*.

На рисунке 3 построен график, показывающий изменения величины относительного коэффициента теплоотдачи в функции временной координаты. В рассматриваемом самом динамичном режиме относительный коэффициент теплоотдачи изначально принимает наиболее максимальную величину. Его значения, как и в других режимах, плавно уменьшаются и в отличие от двух других к окончанию нестационарного процесса принимают значение 0,5.

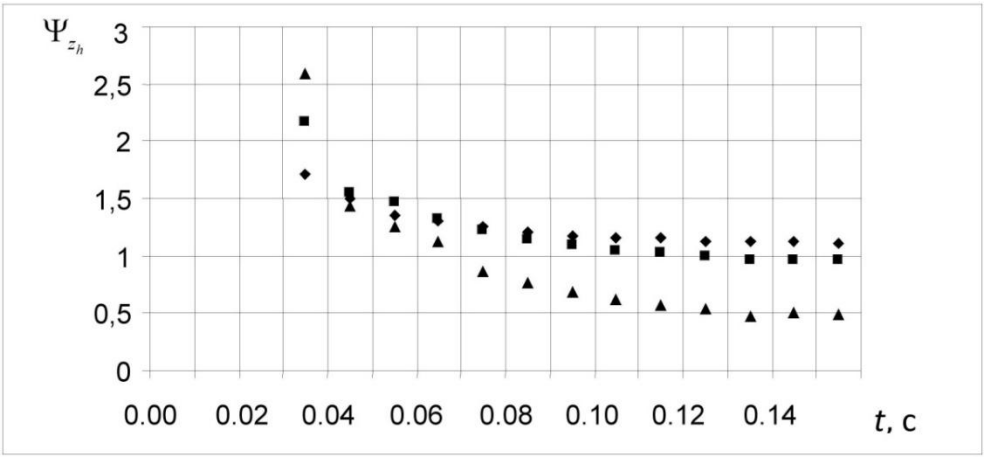

Рис. 3. Изменение во времени величины относительных коэффициентов теплоотдачи ψ_{zh}

Изменения во времени параметра S аналогии Рейнольдса представлено на графике рис. 4. Во всех трех режимах наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса, но более существенно это имеет место в третьем режиме, когда S принимает минимальную величину, равную 0,38. Затем ситуация несколько улучшается с небольшим увеличением параметра. В целом в рассмотренной ситуации можно констатировать нарушение аналогии Рейнольдса, в особенности при высокой динамике нарастания температуры газового потока, и, как следствие, существенное снижение эффективности переноса тепла до 50 с лишним процентов.

Следует отметить, что в рассмотренном процессе резкого увеличения температуры газового потока, коэффициент трения, как видно на рис. 1, консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое.

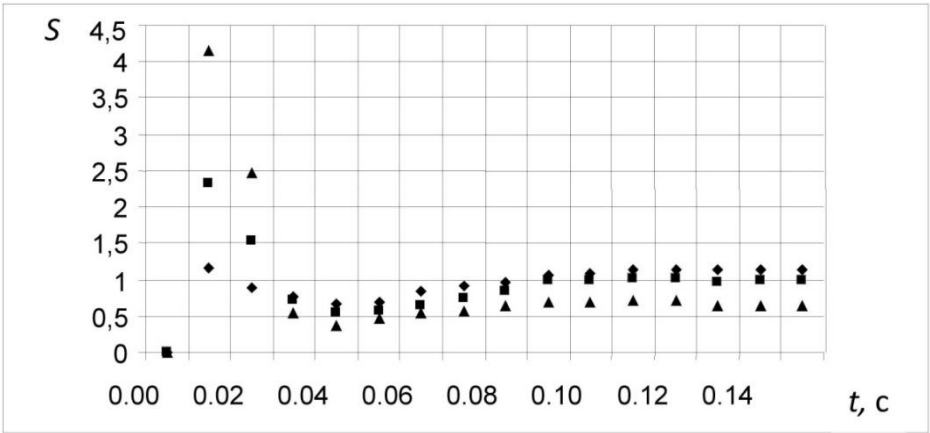

Рис. 4. Изменение во времени величины параметра *S* аналогии Рейнольдса

Выводы. При резком увеличении температуры газового потока формируются тепловая и гидродинамическая нестационарности, причём, чем выше динамика процесса, тем сильнее проявляются эффекты нестационарности, которые совместно с неизотермичностью создают условия по снижению эффективности теплоотдачи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. − М.: Энергия, 1972. − 342 с.
2. Дейч, М. Е. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный / М. Е. Дейч, Л. Я. Лазарев // Инженерно-физический журнал. – 1964. – Т. 7. – № 4. – С. 18 – 24.
3. Бэк, Л. Х. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле / Л. Х. Бэк, П. Ф. Мэссье, Р. Ф. Каффел // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7. – № 4. – С. 194– 196.
4. Datton, R. A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer / R. A. Datton // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 p.
5. Wisniewski, R. E. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 / R. E. Wisniewski, J. R. Jack // Journal of the Aerospace Sci. – 1961. – March. − P. 250.
6. Бэнкстон, К. А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе / К. А. Бэнкстон // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия: С. Теплопередача. − 1970. − Т. 92 − № 4. − С. 1–20.
7. Леонтьев, А. И. Закономерности пристенной турбулентности в градиентной области течения и при сложных тепловых граничных условиях / А. И. Леонтьев, Е. В. Шишов // Пристенные турбулентные течения. – Новосибирск: ИТФ, 1984. − С. 105−111.
8. Володин, Ю. Г. Экспериментальное изучение теплообмена при резком увеличении температуры рабочего тела / Ю. Г. Володин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 168-173. – DOI 10.5281/zenodo.17395033. – EDN YNTRSY.
9. Володин, Ю. Г. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок / Ю. Г. Володин, О. П. Марфина. – Санкт-Петербург: Изд. «Инфо-да», 2007. – 128 с.
10. Volodin, Yu. G. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants / Yu. G. Volodin, K. S. Fedorov, M. V. Yakovlev // Russian Aeronautics. – 2006. – № 49(1). – P. 49-52.

REFERENCES LIST

1. Kutateladze, C. C. Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe / C. C. Kutateladze, A. I. Leontev. − M.: Energiia, 1972. − 342 s.

2. Deich, M. E. Issledovanie perekhoda turbulentnogo pogranichnogo sloia v laminarnyi / M. E. Deich, L. Ia. Lazarev // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. – 1964. – T. 7. – № 4. – S. 18 – 24.
3. Bek, L. Kh. Laminarizatsiia turbulentnogo pogranichnogo sloia pri techenii v sople / L. Kh. Bek, P. F. Messe, R. F. Kaffel // Raketnaia tekhnika i kosmonavtika. – 1969. – T. 7. – № 4. – S. 194– 196.
4. Datton, R. A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer / R. A. Datton // Report and Memoranda № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory. – 1958. – 16 p.
5. Wisniewski, R. E. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 / R. E. Wisniewski, J. R. Jack // Journal of the Aerospace Sci. – 1961. – March. − P. 250.
6. Benkston, K. A. Perekhod ot turbulentnogo techeniia gaza k laminarnomu v nagrevaemoi trube / K. A. Benkston // Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriia: S. Teploperedacha. − 1970. − T. 92 − № 4. − S. 1–20.
7. Leontev, A. I. Zakonomernosti pristennoi turbulentnosti v gradientnoi oblasti techeniia i pri slozhnykh teplovykh granichnykh usloviiakh / A. I. Leontev, E. V. Shishov // Pristennye turbulentnye techeniia. – Novosibirsk: ITF, 1984. − S. 105−111.
8. Volodin, Iu. G. Eksperimentalnoe izuchenie teploobmena pri rezkom uvelichenii temperatury rabochego tela / Iu. G. Volodin // Vestnik Donetskogo natsionalnogo universiteta. Seriia G: Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 3. – S. 168-173. – DOI 10.5281/zenodo.17395033. – EDN YNTRSY.
9. Volodin, Iu. G. Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energeticheskikh ustanovok / Iu. G. Volodin, O. P. Marfina. – Sankt-Peterburg: Izd. «Info-da», 2007. – 128 s.
10. Volodin, Yu. G. Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants / Yu. G. Volodin, K. S. Fedorov, M. V. Yakovlev // Russian Aeronautics. – 2006. – № 49(1). – P. 49-52.

Поступила в редакцию 08.11.2025 г., рекомендована к изданию 20.01.2026 г.

REDUCING THE EFFICIENCY OF THE CYLINDRICAL CHANNEL HEAT TRANSFER BY RAPIDLY INCREASING THE TEMPERATURE OF THE GAS FLOW

Volodin IU.G., Pavlysh V.N.

The article presents the results of an experimental study of friction and heat transfer in a cylindrical tube. The results of the experiment showed that a sharp increase in the temperature of the gas stream contributes to the formation of thermal and hydrodynamic instability, which in combination with non-isothermal conditions create conditions that lead to a decrease in the efficiency of heat transfer. This process is facilitated by the dynamics of the process of increasing the temperature of the flow, starting from the threshold of 3000 K/c and more.

Keywords: experiment, nonstationarity, heat transfer, efficiency of the heat transfer.

Володин Юрий Гурьянович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических объектов водного транспорта Института морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанского филиала ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: yu.g.volodin@mail.ru

Volodin IUrii Gurianovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electromechanical Water Transport Facilities of Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev - Kazan Branch «Volga State University of Water Transport»,
Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.
ORCHID: 0000-0002-7621-1520

Павлыш Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и искусственного интеллекта ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pavlyshvn@mail.ru

Pavlysh Vladimir Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Artificial Intelligence of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.