Научная статья
УДК 536.24
DOI: 10.14529/power260311

ТЕПЛООТДАЧА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРИ РЕЗКОМ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА

***Ю.Г. Володин**, yu.g.volodin@mail.ru*

Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Казань, Россия

Аннотация. 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

Для цитирования: Володин Ю.Г. Теплоотдача в цилиндрическом канале при резком повышении температуры газового потока // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 3. С. 99–105. DOI: 10.14529/power260311

Original article
DOI: 10.14529/power260311

HEAT TRANSFER IN A CYLINDRICAL CHANNEL WITH A SHARP INCREASE IN GAS FLOW TEMPERATURE

***Yu.G. Volodin**, yu.g.volodin@mail.ru*

Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev – Kazan Branch "Volga State University of Water Transport", Kazan, Russia

Abstract. 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

For citation: Volodin Yu.G. Heat transfer in a cylindrical channel with a sharp increase in gas flow temperature. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;25(3):99–105. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260311

© Володин Ю.Г., 2026

Введение

Нестационарные процессы, происходящие в динамических и тепловых пограничных слоях, вызывали и вызывают интерес не только у исследователей, но и у конструкторов, специалистов по эксплуатации оборудования и других специалистов. Нестационарные процессы разделяют на пульсирующие и апериодические. К последнему случаю относятся, например, пусковые режимы энергосиловых установок, когда топливо подается в камеру сгорания и воспламеняется. За короткий промежуток времени в камере сгорания изменяются параметры рабочего тела – плотность и вязкость, формируется и развивается тепловой пограничный слой [1]. Динамический пограничный слой испытывает на себе соответствующие воздействия в связи с изменением тепловой обстановки [2]. Нестационарные процессы широко представлены в литературных источниках, однако практически отсутствует информация о тепловых высоко динамичных процессах [3].

Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса $S = 2\mathrm{St}/C_f$, 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 [4]. Иногда снижение теплоотдачи бывает если предсказуемым, то количественно неожиданным, как у профессора М.Е. Дейча при исследовании обтекания сферы. Обнаруженное явление было названо «обратным переходом» или «ламинаризацией» турбулентного пограничного слоя [5]. Удовлетворением интереса к этому явлению является ряд работ [6–9], 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 [10], 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.

Экспериментальный стенд

Для изучения теплообменных и газодинамических процессов был разработан и изготовлен

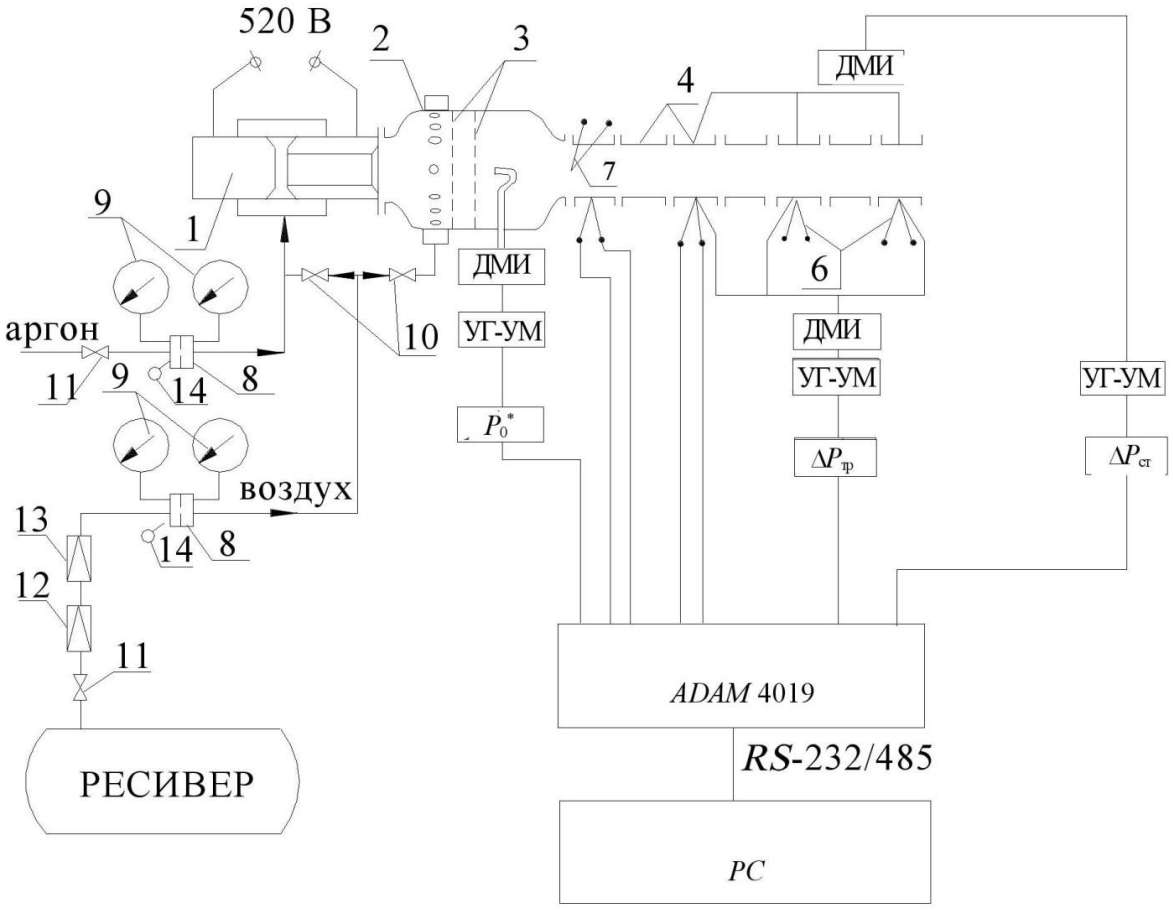

Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

экспериментальный стенд. Основой стенда является разомкнутый газодинамический контур, в котором в качестве генератора тепла используется плазмотрон *1* (рис. 1). Плазмотрон позволяет за очень короткий промежуток времени достичь высоких степеней нагрева рабочего тела. Для чистоты эксперимента необходимо на входе в экспериментальный канал сформировать равномерные профили скорости и температуры. Это достигается путём пристыковки к плазмотрону форкамеры *2* с соплом, спрофилированным по кривой Витошинского [11]. Внутри форкамеры установлены выравнивающие решётки *3* [12], а перед ними просверлены двенадцать радиальных отверстий, через которые подается воздух, минуя плазмотрон, что позволяет варьировать величиной температуры рабочего тела и скоростью её нарастания. К выходу сопла крепится экспериментальный канал *4*, состоящий из семи секций диаметром и длиной 45 мм с толщиной стенки 0,08 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Воздух, подаваемый в плазмотрон, поступал из ресивера, в который закачивался компрессором, и проходил через фильтры грубой *12* и тонкой *13* очистки и запорно-регулировочную арматуру *10* и *11*. В состав измерительно-регистрирующей системы входили первичные преобразователи, согласующие устройства и регистратор. Расход рабочего тела (воздуха) измерялся расходомером переменного перепада давления, который не входил в измерительно-регистрирующую систему. Температуры измерялись микротермопарами [13, 14] с диаметром термоэлектродных проводов 65 мкм, давления – индуктивными датчиками давления ДМИ-0,1-2 в комплекте с приборами УГ-УМ. Хромель-алюмелевой термопарой *7* измерялась температура рабочего тела на входе в экспериментальный канал. Хромель-копелевыми термопарами 6 измерялась температура стенки канала в функции продольной координаты и времени. Концы термоэлектродных проводов, раскатанные до 20 мкм, приваривались к наружной поверхности канала в середине 1, 3, 5 и 7-й секций канала. Измерение полного давления проводилось в форкамере трубкой полного напора в форме «лебединой шеи» [15]. Касательные напряжения трения изменялись методом «трубка – выступ» [16, 17].

Результаты исследований

Экспериментальные исследования проведены в интервале среднерасходного числа Рейнольдса от 30 000 до 60 000. При этом температура рабочего тела в приосевой области изменялась в диапазоне $T = 293…1500$ К с увеличением температуры потока до 12 000 К/с и скорости потока до 700 м/с^2 (рис. 2). Были посчитаны среднеквадратичные погрешности [18], величины которых не превысили значений при определении температуры 0,75 %, скорости потока 1,6 %, коэффициентов трения и теплоотдачи соответственно 9,2 и 9,5 %.

Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области и скорости потока формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 3, 4). 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 [19], а перестройка кинематической структуры приводит к увеличению пристеночных касательных напряжений трения [2]. На рис. 3 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). Увеличение температуры потока и его динамики приводят к большему нарастанию величины коэффициента трения, который определяется по выражению

$$\frac{c_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho_0 w_0^2}. \qquad (1)$$

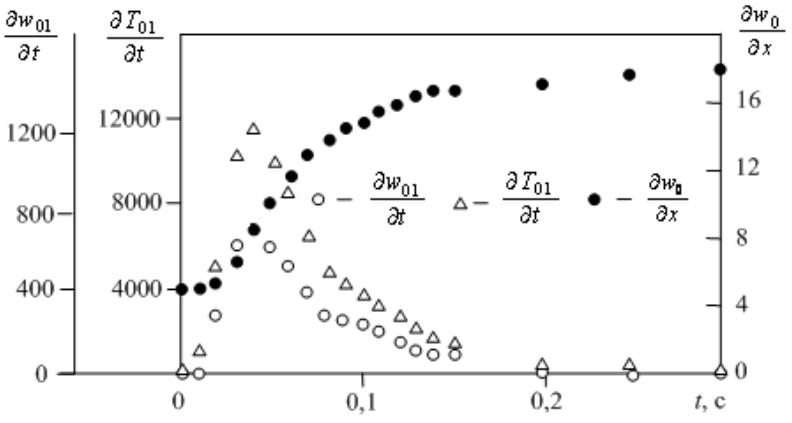

Рис. 2. Изменения во времени производных скорости и температуры потока
Fig. 2. Time history of velocity and flow temperature derivatives

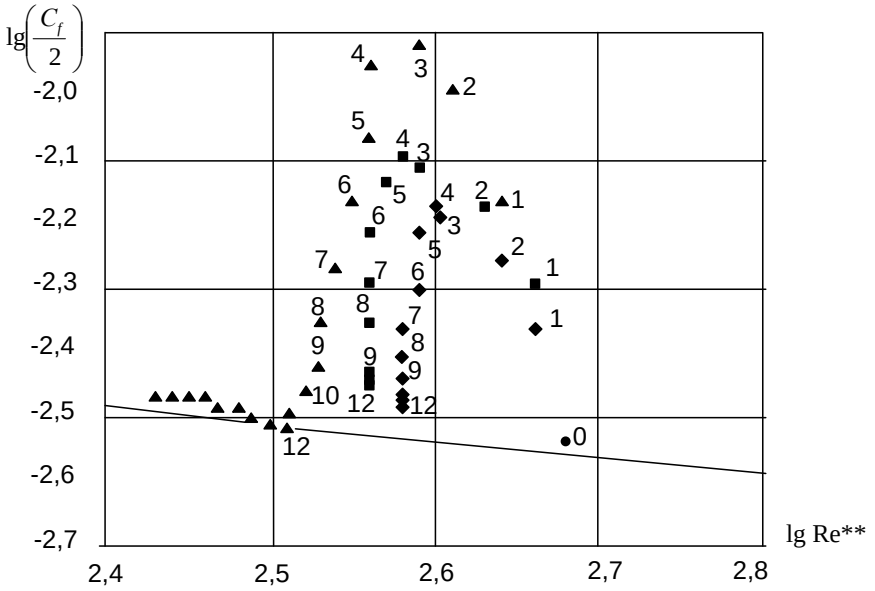

Рис. 3. Зависимость коэффициента трения C_f от характерного числа $\mathbf{Re}^{**}$. Цифры обозначают время: 1 – 0,01 с; 2 – 0,02 с; …; 12 – 0,12 с

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient C_f on the Reynolds number $\mathbf{Re}^{**}$. The numbers indicate time: 1 – 0,01 s; 2 – 0,02 s; …; 12 – 0,12 s

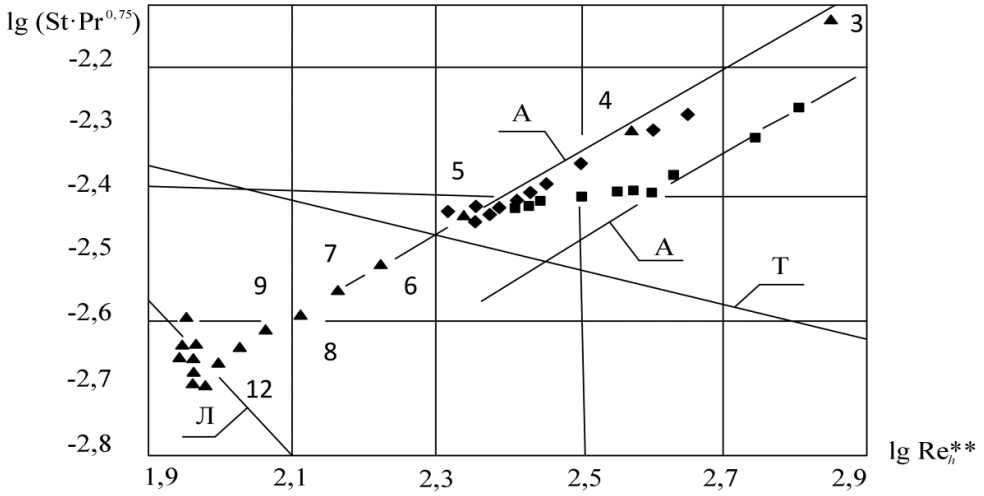

Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи St от числа $\mathbf{Re}_h^{**}$. Цифры обозначают время: 3 – 0,03 с; 4 – 0,04 с; …; 12 – 0,12 с

Fig. 4. Dependence of the Stanton number St on the Reynolds number $\mathbf{Re}_h^{**}$. The numbers indicate the time: 3 – 0,03 s; 4 – 0,04; …; 12 – 0,12 s

Массовая скорость в знаменателе – величина постоянная по условиям эксперимента. Таким образом, коэффициент трения повторяет характер изменения касательных напряжений трения τ_w. 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 с нестационарный 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 с производная имеет постоянную величину, т. е. стенка канала прогревается с постоянной скоростью.

Плотность теплового потока, определяемая по выражению

$$q_w = C_{pw}\rho_w \Delta_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \Delta q_w, \quad (2)$$

также имеет постоянную величину с момента 0,06 с. 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:

$$\alpha = \frac{q_w}{t_0^* - t_w}, \quad (3)$$

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

$$\mathrm{St} = \frac{q_w}{\rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)}. \quad (4)$$

На графике рис. 4 кроме экспериментальных точек построены прямые:

Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

$$\mathrm{St}_0 = \frac{0{,}0128}{\mathrm{Re}_h^{**0{,}25}\mathrm{Pr}^{0{,}75}}; \quad (5)$$

Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

$$\mathrm{St}_0 = \frac{0{,}22}{\mathrm{Re}_h^{**}\mathrm{Pr}^{4/5}};$$

А – аппроксимационное выражение:

$$\Psi_{z_h} = \frac{\mathrm{St}}{\mathrm{St}_0} = \frac{1}{w_0^2}\frac{\partial w_0}{\partial t}\sqrt{\frac{1}{\mathrm{Re}_h^{**}}\frac{1}{\Delta h}\frac{d(\Delta h)}{dt}}.$$

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 (4), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи St, следует, что причиной ламинаризации ТПС является неизотермичность (так как массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени) и параметром ламинаризации следует определить температурный фактор ψ_h или температурный напор ΔT. По изменению величины последнего определены границы области ламинаризации ТПС $\Delta T \geq 700$ К и переходной области от 350 до 700 К.

На рис. 5 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.

Изменения во времени параметра *S* аналогии Рейнольдса представлены на графике рис. 6. 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. 3, консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое.

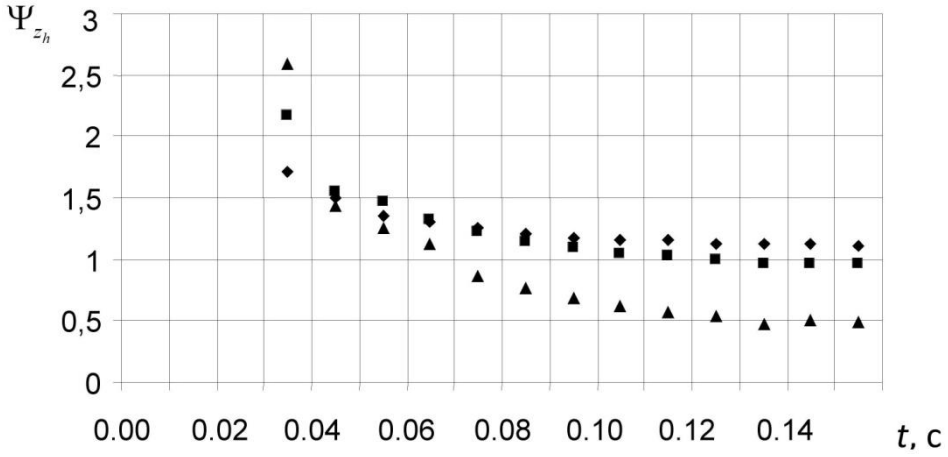

Рис. 5. Изменение во времени относительных коэффициентов теплоотдачи Ψ_{z_h}
Fig. 5. Change in the relative coefficients of heat transfer over time Ψ_{z_h}

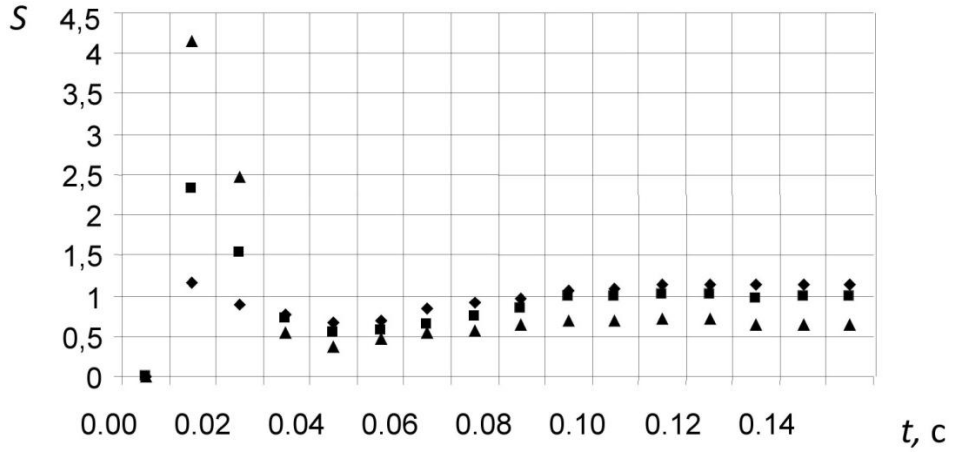

Рис. 6. Изменение во времени параметра *S* аналогии Рейнольдса
Fig. 6. Time variation of the Reynolds analogy factor *S*

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 литературы

1. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Нестационарные эффекты и теплообмен в пусковом режиме энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2006. № 4. С. 41–44.

2. Володин Ю.Г., Федоров К.С., Яковлев М.В. Нестационарные эффекты и трение при запуске энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2006. № 1. С. 34–36.

3. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Kirpichnikov A.P. Features of heat transfer at increase of temperature of the working body, intensive up to 12000 K/s // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1328 (1). P. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012013

4. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972. 342 с.

5. Дейч М.Е., Лазарев Л.Я. Исследование перехода турбулентного пограничного слоя в ламинарный // Инженерно-физический журнал. 1964. Т. 7, № 4. С. 18–24.

6. Бэк Л.Х., Мэссье П.Ф., Каффел Р.Ф. Ламинаризация турбулентного пограничного слоя при течении в сопле // Ракетная техника и космонавтика. 1969. Т. 7, № 4. С. 194–196.

7. Dutton R.A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer // Report and Memoranda no. 3155. Cambridge: Engineering Laboratory, 1958. 16 p.

8. Wisniewski R.E., Jack J.R. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 // Journal of the Aerospace Sciences. 1961. Vol. 28, no. 3. P. 250.

9. Бэнкстон К.А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия: С. Теплопередача. 1970. Т. 92, № 4. С. 1–20.

10. Леонтьев А.И., Шишов Е.В. Закономерности пристенной турбулентности в градиентной области течения и при сложных тепловых граничных условиях // Пристенные турбулентные течения. Новосибирск: ИТФ, 1984. С. 105−111.

11. Бошняк Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. М.: Машиностроение, 1974. 447 с.

12. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1974. 479 с.

13. Исследование тепловой инерционности микротермопар / Ю.Г. Володин, И.Ф. Закиров, К.С. Федоров, М.В. Яковлев // Датчики и системы. 2007. № 6. С. 33–35.

14. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1990. 256 с.

15. Петунин А.Н. Измерение параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1974. 260 с.

16. Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина, А.Н. Богданов и др. // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 34–36.

17. Репик Е.У., Кузенков Б.К. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое // Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 38, № 2. С. 197–200.

18. Володин Ю.Г. Об определении погрешностей в нестационарном теплофизическом эксперименте. Казань, 1986. 7 с. Деп. в ОНИИТЭХИМ, г. Черкассы, 16.01.1986, № 201 хп–86.

19. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок. СПб.: Инфо-да, 2007. 128 с.

References

1. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Nonstationary effects and heat exchange in starting conditions of power plants. *Russian Aeronautics*. 2006;49(4):63–68.

2. Volodin Yu.G., Fedorov K.S., Yakovlev M.V. Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants. *Russian Aeronautics*. 2006;49(1):49–52.

3. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Kirpichnikov A.P. Features of heat transfer at increase of temperature of the working body, intensive up to 12000 K/s. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1328(1):012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1328/1/012013

4. Kutateladze C.C., Leont'ev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat and mass transfer and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow: Energiya, 1972. 342 p. (In Russ.)

5. Deych M.E., Lazarev L.Ya. [Investigation of the transition from a turbulent to a laminar boundary layer]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1964;7(4):18–24. (In Russ.)

6. Back L.H., Massier P.F., Cuffel R.F. Laminarization of a Turbulent Boundary Layer in Nozzle Flow. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*. 1969;7(4):194–196 (In Russ.)

7. Dutton R.A. The Effects of Distributed Suction on the Development in Turbulent Boundary Layer. Report and Memoranda no. 3155. Cambridge: Engineering Laboratory, 1958. 16 p.

8. Wisniewski R.E., Jack J.R. Resent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4. *Journal of the Aerospace Sciences*. 1961;28(3):250.

9. Bankston C.A. The Transition from Turbulent to Laminar Gas Flow in a Heated Pipe. *ASME Journal of Heat Transfer*. 1970;92(4):569–579.

10. Leont'ev A.I., Shishov E.V. [Patterns of wall turbulence in the gradient region of the flow and under complex thermal boundary conditions]. In: *Pristennye turbulentnye techeniya* [Near-Wall Turbulent Flows]. Novosibirsk: ITF, 1984. P. 105−111. (In Russ.)

11. Boshnyak L.L. *Izmereniya pri teplotekhnicheskikh issledovaniyakh* [Measurements in thermal engineering research]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 447 p. (In Russ.)

12. Povkh I.L. *Aerodinamicheskiy eksperiment v mashinostroenii* [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1974. 479 p. (In Russ.)

13. Volodin Yu. G., Zakirov I. F., Fyodorov K. S., Yakovlev M. V. Investigation of microthermocouples' thermal inertia. *Sensors and Systems*. 2007;(6):33–35. (In Russ.)

14. Yaryshev N.A. *Teoreticheskie osnovy izmereniya nestatsionarnykh temperatur* [Theoretical foundations of measurement of unsteady temperatures]. Leningrad: Energiya, 1990. 256 p. (In Russ.)

15. Petunin A.N. *Izmerenie parametrov gazovogo potoka* [Measurement of gas flow parameters]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 260 p. (In Russ.)

16. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Bogdanov A.N., Tsvetkovich M.S., Kuznetsov A.B. Measuring tangential friction stress in nonstationary gas flow. *Sensors and Systems*. 2009;(2):34–36. (In Russ.)

17. Repik E.U., Kuzenkov V.K. A new method of experimental determination of surface friction in a turbulent boundary layer. *Journal of Engineering Physics*. 1980;38(2):113–116. DOI: 10.1007/bf00861861

18. Volodin Yu.G. Volodin Yu.G. *Ob opredelenii pogreshnostey v nestatsionarnom teplofizicheskom eksperimente* [On the determination of errors in an unsteady thermophysical experiment]. Kazan, 1986. 7 p. (In Russ.)

19. Volodin Yu.G., Marfina O.P. *Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling of starting modes of power plants]. St. Petersburg: Info-da, 2007. 128 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Володин Юрий Гурьянович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электромеханических объектов водного транспорта, Институт морского и речного флота имени Героя Советского Союза М.П. Девятаева – Казанский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Казань, Россия; yu.g.volodin@mail.ru.

Information about the author

Yuriy G. Volodin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. at the Department of Electromechanical Water Transport Facilities, Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M.P. Devyataev – Kazan Branch "Volga State University of Water Transport", Kazan, Russia; yu.g.volodin@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.12.2025; одобрена после рецензирования 10.12.2025; принята к публикации 10.12.2025.

The article was submitted 05.12.2025; approved after review 10.12.2025; accepted for publication 10.12.2025.