

## СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И МАШИННО-ДВИЖИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

## SHIP POWER PLANTS AND PROPULSION SYSTEMS

Научная статья  
УДК 536.24+532.52  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-2-7-14>  
EDN FGJHKW

### Снижение теплоотдачи в пусковом режиме судового газотурбинного двигателя

*Юрий Гурьянович Володин*

*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](mailto:yu.g.volodin@mail.ru)*

---

**Аннотация.** Приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи и трения в цилиндрической трубе, имитирующей камеру сгорания газотурбинного двигателя. Эксперименты проведены на газодинамическом стенде, который представляет собой аэродинамический контур разомкнутого типа. Рабочим телом в экспериментальных исследованиях был воздух. В качестве генератора теплоты использован плазмотрон, изготовленный по однокамерной схеме с неохлаждаемыми медными электродами. Имитация пускового режима газотурбинного двигателя проводилась включением плазмотрона, который позволял за короткий промежуток времени получить высокие степени нагрева газового потока до величины энтальпийного фактора 0,25. Резкое увеличение температуры потока с динамикой до 12 000 К/с сопровождается соответствующим изменением величин плотности и вязкости рабочего тела и в итоге увеличением его скорости с ускорением до 700 м/с<sup>2</sup>. Производные температуры и скорости потока по времени определяют наличие эффектов тепловой и гидродинамической нестационарности в условиях существенной неизотермичности. В рассматриваемой термогазодинамической обстановке таким образом формируются условия, при которых снижается интенсивность переноса тепла. Детальный анализ экспериментальных данных позволил определить порог, за пределами которого начинает снижаться эффективность теплоотдачи. Этому способствует динамика процесса нарастания температуры потока начиная с 3 000 К/с и более, а также температурный напор более 700 К и формирующаяся при этих условиях ламинаризация теплового турбулентного пограничного слоя. При максимальных значениях временных производных температуры и скорости потока коэффициент трения достигает своей максимальной величины, увеличиваясь в несколько раз. За пределами воздействия эффектов нестационарности при ламинаризации турбулентного пограничного слоя коэффициент трения консервативен к происходящему.

**Ключевые слова:** эксперимент, нестационарность, теплоотдача, эффективность теплоотдачи, судовой газотурбинный двигатель

**Для цитирования:** Володин Ю. Г. Снижение теплоотдачи в пусковом режиме судового газотурбинного двигателя // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2026. № 2. С. 7–14. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-2-7-14>. EDN FGJHKW.

Original article

## Reduction of heat dissipation in start-up mode of marine gas turbine engine

Yuri G. Volodin

Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M. P. Devyataev –  
Kazan Branch of the FSBEI HE "Volga State University of Water Transport",  
Kazan, Russia, yu.g.volodin@mail.ru

**Abstract.** The results of an experimental study of heat transfer and friction in a cylindrical tube imitating the combustion chamber of a gas turbine engine are presented. The experiments were carried out on a gas dynamic stand, which is an open-type aerodynamic contour. The working medium in the experimental studies was air. A plasma torch manufactured according to a single-chamber circuit with uncooled copper electrodes was used as a heat generator. The simulation of the starting mode of a gas turbine engine was carried out by switching on a plasma torch, which allowed for a short period of time to obtain high degrees of heating of the gas stream to an enthalpy factor of 0.25. A sharp increase in the flow temperature with dynamics up to 12 000 K/s is accompanied by a corresponding change in the density and viscosity of the working fluid and, as a result, an increase in its velocity with acceleration up to 700 m/s<sup>2</sup>. The derivatives of temperature and flow velocity with respect to time determine the presence of thermal and hydrodynamic instability effects under conditions of significant nonisothermicity. In the thermogasodynamic environment under consideration, conditions are thus formed under which the intensity of heat transfer decreases. A detailed analysis of the experimental data allowed us to determine the threshold beyond which the efficiency of heat transfer begins to decrease. This is facilitated by the dynamics of the process of increasing the flow temperature from 3 000 K/s or more, as well as a temperature pressure of more than 700 K and the laminarization of the thermal turbulent boundary layer formed under these conditions. At the maximum values of the temporary production temperature and flow velocity, the coefficient of friction reaches its maximum value, increasing several times. Outside of the effects of unsteadiness during laminarization of the turbulent boundary layer, the coefficient of friction is conservative to what is happening.

**Keywords:** experiment, unsteadiness, heat release, efficiency of heat release, marine gas turbine engine

**For citation:** Volodin Yu. G. Reduction of heat dissipation in start-up mode of marine gas turbine engine. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2026;2:7-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2026-2-7-14>. EDN FGJHKW.

### 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 аperiодические. 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 высокочастотных процессах [3].

Эффективность теплоотдачи оценивают параметром аналогии Рейнольдса  $S = 2St / C_f$ , представляющим собой отношение коэффициента теплоотдачи к коэффициенту трения. В условиях внутрен-

ней задачи, например при торможении потока, теплоотдача увеличивается, а при ускорении, наоборот, снижается [4]. В некоторых случаях снижение теплоотдачи бывает предсказуемым, но количественно неожиданным, как у профессора М. Е. Дейча при исследовании обтекания сферы. Явление, которое он открыл первым, получило название «обратного перехода», или «ламинаризации» турбулентного пограничного слоя (ТПС) [5]. В результате дальнейших экспериментальных исследований в условиях внутренней задачи, выполненных другими учеными в различных странах [6–9], явление ламинаризации ТПС зафиксировали при различных видах воздействий – отрицательный продольный градиент давления, отсос пограничного слоя, охлаждение или нагрев стенки канала и др. В работе [10] экспериментально исследовалась структура динамического и теплового пограничных слоев. Результаты эксперимента доказали, что при проявлении эффекта ламинаризации ТПС пограничный слой остается турбулентным, а механизм турбулентного переноса существенно ослабевает, и, как следствие, уменьшается в 2,0–2,5 раза величина коэффициента теплоотдачи  $St$ , и нарушается аналогия Рейнольдса.

### Экспериментальный стенд

Для изучения теплообменных и газодинамических процессов был разработан и изготовлен 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 путем пристыковки к плазмотрону форкамеры 2 с соплом, спрофилированным по кривой Витошинского [11]. Внутри форкамеры установлены выравнивающие решетки 3 [12], а перед ними просверлены двенадцать радиальных отверстий, через которые подается воздух минуя плазмотрон, что позволяет варьировать величиной температуры рабочего тела и скоростью ее 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 тон-

кой 13 очистки и запорно-регулирующую 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 8, который не входил в измерительно-регистрирующую систему. Давление до и после диафрагмы измерялось образцовыми манометрами 9, а температура рабочего тела – стеклянным термометром 14. Температуры измерялись микротермопарами [13, 14] с диаметром термоэлектродных проводов 65 микронов, 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 микронов, приваривались к наружной поверхности канала в середине 1-й, 3-й, 5-й и 7-й секций канала. Измерение полного давления проводилось в форкамере трубкой полного напора 5 в форме «лебединой шеи» [15]. Касательные напряжения трения изменялись методом «трубка-выступ» [16, 17].

Volodin Yu. G. Reduction of heat dissipation in start-up mode of marine gas turbine engine

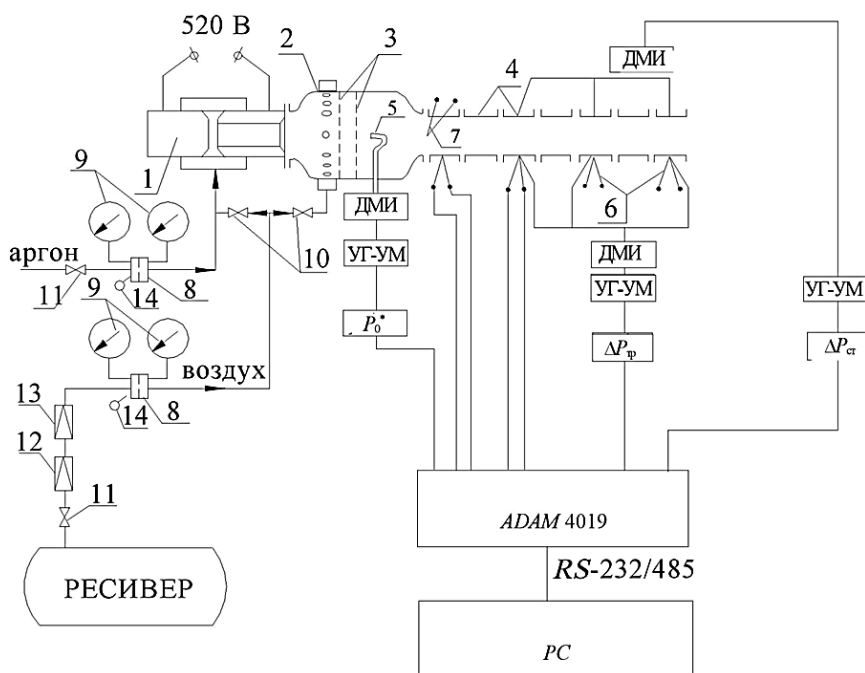


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand

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

$T = 293\text{--}1\ 500\text{ K}$  с увеличением температуры потока с градиентом до  $12\ 000\text{ K/c}$  и скорости потока с градиентом до  $700\text{ м/с}^2$ . Были посчитаны среднеквадратичные погрешности [18], величины которых

не превысили значений при определении температуры 0,75 %, скорости потока 1,6 %, коэффициентов трения и теплоотдачи 9,2 и 9,5 % соответственно.

### Результаты исследований

Резкое увеличение температуры газового потока в потенциальной области с градиентом температуры 12 000 К/с и с градиентом скорости потока 700 м/с<sup>2</sup> формируют тепловую и гидродинамическую нестационарности, которые, в свою очередь, изменяют величины коэффициентов трения и теплоотдачи (рис. 2, 3). С изменением температуры потока изменяются теплофизические свойства рабочего тела, такие как плотность и вязкость, следовательно, изменяются параметры пограничных

слоев 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. 2 представлена зависимость коэффициента трения в функции характерного числа Рейнольдса при разной динамике нарастания температуры газового потока: 2 500 К/с и 150 м/с<sup>2</sup> (точки обозначены ромбом), 6 000 К/с и 350 м/с<sup>2</sup> (квадраты), 12 000 К/с и 700 м/с<sup>2</sup>. Цифры обозначают время: 1 – 0,01 с; 2 – 0,02 с; 3 – 0,03 с; ..., 11 – 0,1 с; 12 – 0,12 с (треугольники). На рис. 3: 3 – 0,03 с; 4 – 0,04 с, ..., 11 – 0,1 с; 12 – 0,12 с.

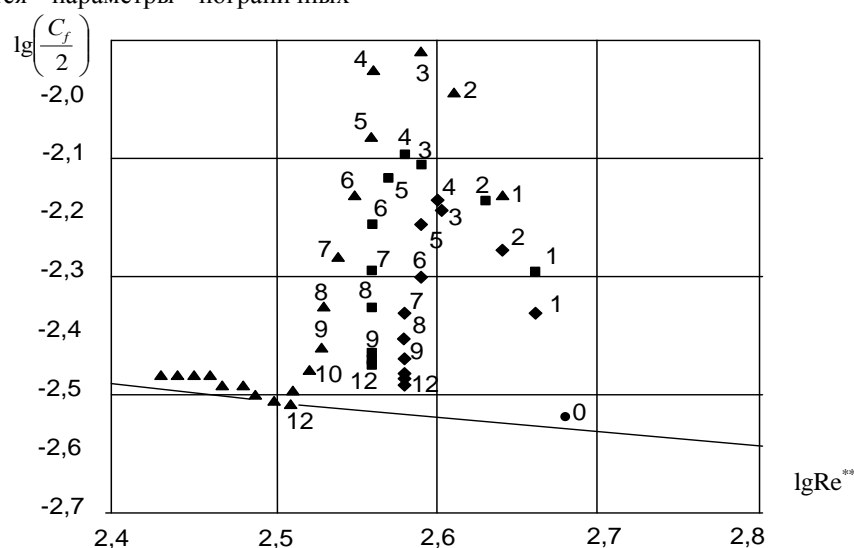


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента трения  $C_f$  от характерного числа Рейнольдса  $Re^{**}$

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction  $C_f$  on the characteristic Reynolds number  $Re^{**}$

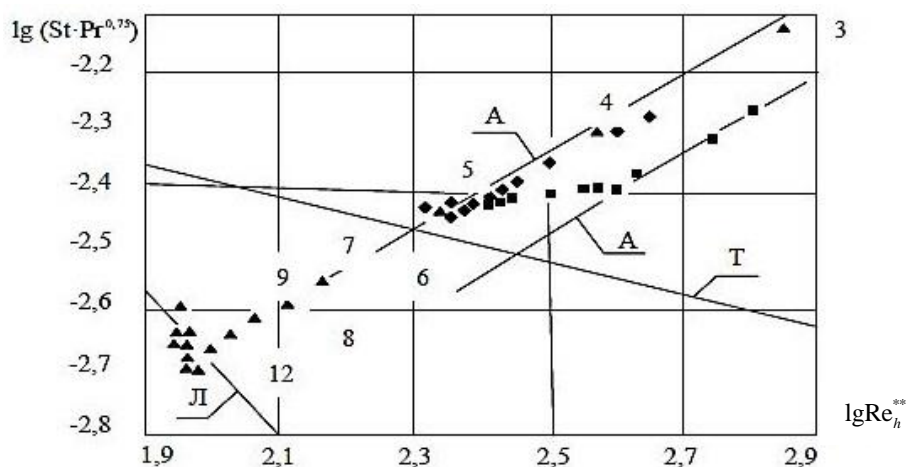


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента теплоотдачи  $St$  от числа Рейнольдса  $Re_h^{**}$

Fig. 3. Dependence of the value of the heat transfer coefficient  $St$  on the Reynolds number  $Re_h^{**}$

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

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

где массовая скорость  $\rho_0 w_0$  в знаменателе – величина постоянная по условиям эксперимента. В силу прямо пропорциональной зависимости коэффициент трения повторяет характер изменения касательных напряжений трения  $\tau_w$ . 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. С начала эксперимента временная производная температуры стенки канала увеличивается, что вполне логично, а начиная с момента времени 0,06 с производная имеет постоянную величину, т. е. стенка канала прогревается с постоянной интенсивностью. 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 с. Здесь  $\Delta q_w$  – потери тепла, обусловленные свободной конвекцией и лучистым теплообменом, ввиду отсутствия теплоизоляции наружной поверхности канала, которые не превысили 5 %. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  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

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

На рис. 3 кроме экспериментальных точек построены зависимости:

1. Т – стандартный закон теплоотдачи для турбулентных режимов течения:

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

2. Л – стандартный закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения:

$$St_0 = \frac{0,22}{Re_h^{**} Pr^{4/3}}.$$

3. А – аппроксимационное выражение:

$$\Psi_{z_h} = \frac{St}{St_0} = \frac{1}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial t} \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**}} \frac{1}{\Delta h} \frac{d(\Delta h)}{dt}}.$$

Отслеживая перемещения экспериментальных точек, удалось определить величину производной температуры потока по времени – около 3 000 К/с. С этого порога начинает снижаться величина коэффициента теплоотдачи ниже стандартного значения при увеличении температуры газового потока и уменьшении числа  $Re_h^{**}$ . На рис. 3 наблюдается миграция экспериментальных точек в нижний левый угол, где они группируются около прямой Л, что свидетельствует о ламинаризации теплового ТПС. Анализ выражения (1), по которому определялась величина коэффициента теплоотдачи  $St$ , позволил определить причину ламинаризации ТПС. Причиной является неизотермичность, т. к. массовая скорость и тепловой поток не изменяются во времени, следовательно, параметром ламинаризации может быть температурный фактор  $\Psi_h$  или температурный напор  $\Delta T$ . По изменению величины температурного напора определены границы области ламинаризации ТПС  $\Delta T \geq 700$  К и переходной области от 350 до 700 К.

На рис. 4 представлена зависимость относительного коэффициента теплоотдачи в функции временной координаты. В рассматриваемом динамичном режиме относительный коэффициент теплоотдачи изначально принимает наибольшую величину. Значения относительного коэффициента теплоотдачи, 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 рис. 5. 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 более чем на 50 %. В рассмотренном процессе резкого увеличения температуры газового потока коэффициент трения консервативен к происходящему в тепловом пограничном слое (см. рис. 1).

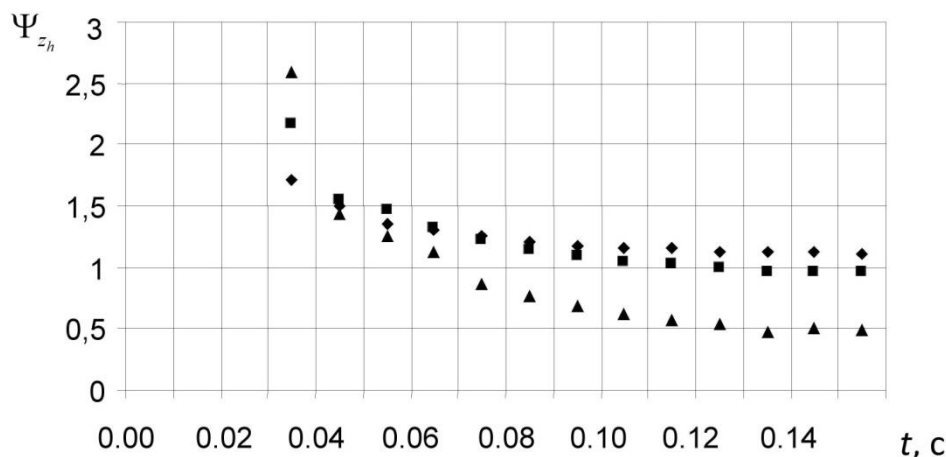


Рис. 4. Изменение во времени величины относительных коэффициентов теплоотдачи  $\Psi_{zh}$

Fig. 4. Time variation of the relative heat transfer coefficients  $\Psi_{zh}$

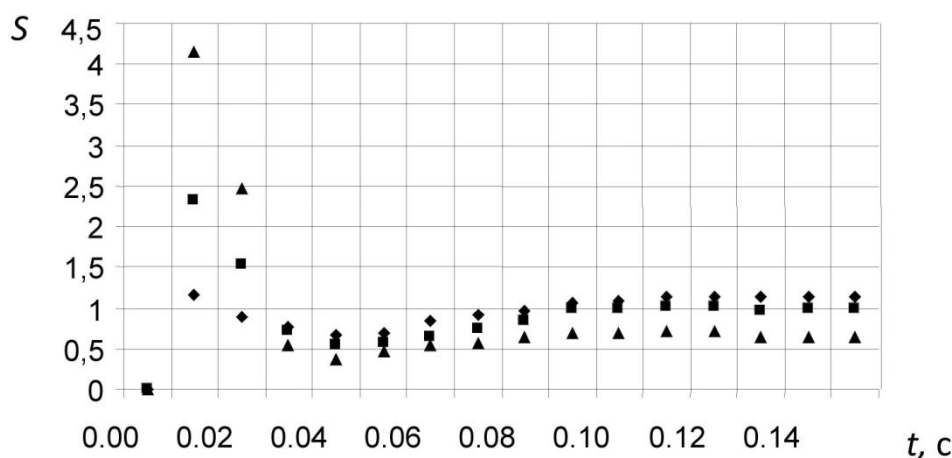


Рис. 5. Изменение во времени величины параметра  $S$  аналогии Рейнольдса

Fig. 5. Time change in the value of the parameter  $S$  of the Reynolds analysis

### Заключение

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

отдачи. Факт снижения интенсивности переноса тепла весьма важен, особенно в процессе определения теплонпряженных участков в конструкциях и элементах судовых газотурбинных двигателей, при решении вопросов о перегреве этих участков и, как следствие, формировании внештатных ситуаций.

### Список источников

1. Volodin Yu. G. Nonstationary effects and heat exchange in starting conditions of power plants // Russian Aeronautics. 2006. N. 49 (4). P. 63–68.
2. Volodin Yu. G. Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants // Russian Aeronautics. 2006. N. 49 (1). P. 49–52.
3. Volodin Yu. G. Features of heat transfer at increase of temperature of the working body, intensive up to 12 000 K/s //

Journal of Physics: Conference Series. 2019. N. 1. P. 1328.

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

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

6. Бэк Л. Х., Мэссе 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 № 3155. Cambridge: Engineering Laboratory, 1958. 16 p.

8. Wisniewski R. E., Jack J. R. Recent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4 // Journal of the Aerospace Sciences. 1961. March. P. 250.

9. Бэнкстон К. А. Переход от турбулентного течения газа к ламинарному в нагреваемой трубе // Тр. Американ. о-ва инженеров-механиков. Сер. 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: Изд-во 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. отделение, 1974. 479 с.

13. Володин Ю. Г., Закиров И. Ф., Федоров К. С., Яковлев М. В. Исследование тепловой инерционности микротермопар // 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. Володин Ю. Г., Марфина О. П., Богданов А. Н., Цветкович М. С., Кузнецов А. Б. Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 34–36.

17. Репик Е. У., Кузнецов Б. К. Исследование нового метода опытного определения поверхностного трения в турбулентном пограничном слое // Инженер.-физ. журн. 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. Nonstationary effects and heat exchange in starting conditions of power plants. *Russian Aeronautics*, 2006, no. 49 (4), pp. 63–68.

2. Volodin Yu. G. Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants. *Russian Aeronautics*, 2006, no. 49 (1), pp. 49–52.

3. Volodin Yu. G. Features of heat transfer at increase of temperature of the working body, intensive up to 12 000 K/s. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1, p. 1328.

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

5. Dejch M. E., Lazarev L. Ya. Issledovanie perekhoda turbulentnogo pogranichnogo sloya v laminarnyj [Investigation of the transition of a turbulent boundary layer to a laminar one]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1964, vol. 7, no. 4, pp. 18–24.

6. Bek L. H., Mess'e P. F., Kaffel R. F. Laminarizatsiya turbulentnogo pogranichnogo sloya pri techenii v sople [Laminarization of the turbulent boundary layer during flow in the nozzle]. *Raketnaya tekhnika i kosmonavtika*, 1969, vol. 7, no. 4, pp. 194–196.

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

8. Wisniewski R. E., Jack J. R. Recent Studies on the Effect of Cooling on Boundary Layers Transition at Mach 4. *Journal of the Aerospace Sciences*, 1961, march, p. 250.

9. Benkston K. A. Perekhod ot turbulentnogo techeniya gaza k laminarnomu v nagrevaemoj trube [Transition from turbulent gas flow to laminar flow in a heated pipe]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya*

*S: Teplote-redacha*, 1970, vol. 92, no. 4, pp. 1–20.

10. Leont'ev A. I., Shishov E. V. Zakonomernosti pristennoj turbulentnosti v gradientnoj oblasti techeniya i pri slozhnyh teplovyh granichnyh usloviyah [Patterns of wall turbulence in the gradient flow region and under difficult thermal boundary conditions]. *Pristennyye turbulentnyye techeniya*. Novosibirsk, Izd-vo ITF, 1984. Pp. 105–111.

11. Boshnyak L. L. *Izmereniya pri teplotekhnicheskikh issledovaniyah* [Measurements in thermal engineering studies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 447 p.

12. Povh I. L. *Aerodinamicheskij eksperiment v mashinostroenii* [Aerodynamic experiment in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningradskoe otdelenie, 1974. 479 p.

13. Volodin Yu. G., Zakirov I. F., Fedorov K. S., Yakovlev M. V. Issledovanie teplovoj inercionnosti mikrotermopar [Investigation of thermal inertia of microthermopars]. *Datchiki i sistemy*, 2007, no. 6, pp. 33–35.

14. Yaryshev N. A. *Teoreticheskie osnovy izmereniya nestacionarnykh temperatur* [Theoretical foundations of measurement of nonstationary temperatures]. Leningrad, Energiya Publ., 1990. 256 p.

15. Petunin A. N. *Izmerenie parametrov gazovogo potoka* [Measurement of gas flow parameters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 260 p.

16. Volodin Yu. G., Marfina O. P., Bogdanov A. N., Cvetkovich M. S., Kuznecov A. B. Izmerenie kasatel'nyh napryazhenij treniya v nestacionarnom gazovom potoke [Measurement of tangential frictional stresses in an unsteady gas flow]. *Datchiki i sistemy*, 2009, no. 2, pp. 34–36.

17. Repik E. U., Kuzenkov B. K. Issledovanie novogo metoda opytnogo opredeleniya poverhnostnogo treniya v turbulentnom pogranichnom sloe [Investigation of a new method

for experimental determination of surface friction in a turbulent boundary layer]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 1980, vol. 38, no. 2, pp. 197-200.

18. Volodin Yu. G. *Ob opredelenii pogreshnostej v nestacionarnom teplofizicheskom eksperimente* [On the determination of errors in an unsteady thermophysical experiment]. Ка-

zan', 1986. 7 p. Dep. v ONIITEKhIM g. Cherkassy. 16.01.1986. № 201 hp – 86.

19. Volodin Yu. G., Marfina O. P. *Matematicheskoe modelirovanie puskovyh rezhimov energeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling of starting modes of power plants]. Saint Petersburg, Info-da Publ., 2007. 128 p.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2026; принята к публикации 27.04.2026  
The article was submitted 09.12.2025; approved after reviewing 21.04.2026; accepted for publication 27.04.2026

### **Информация об авторе / Information about the author**

**Юрий Гурьянович Володин** – кандидат технических наук, доцент; доцент 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»; yu.g.volodin@mail.ru

**Yuri G. Volodin** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Electromechanical Facilities of Water Transport; Institute of Maritime and Inland Shipping named after Hero of the Soviet Union M. P. Devyataev – Kazan Branch of the FSBEI HE “Volga State University of Water Transport”; yu.g.volodin@mail.ru

