



## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ СБРОСЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА

Гильфанов К.Х.<sup>1</sup>, Гайнуллин Р.Н.<sup>2</sup>, Ахмадеев У.М.<sup>1</sup>, Гилязов Д.Р.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
г. Казань, Россия

<sup>3</sup>ООО «КЭР-Инжиниринг», г. Казань, Россия  
kamil.gilfanov@yandex.ru

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Исследование развития нестационарного теплового пограничного слоя турбулентного потока газа в начальном участке цилиндрического канала. МЕТОДЫ. Исследование выполнено экспериментально и путем математического моделирования. Опыты выполнены на стенде с плазменным подогревом рабочего тела (воздуха). Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа. Температура газа достигала до 1400 К, температура стенки повышалась до 700 К. Нестационарные условия реализуются при включении и выключении плазмотрона. При выключении электродугового нагревателя осуществлялся сброс тепловой нагрузки, приводящий к уменьшения температуры газа со скоростью по абсолютной величине до 5000 К/с и температуры стенки около 100 К/с. Профили температур потока измерены с помощью хромель-алюмелевых термопар. Математическая модель основывается на теории пограничного слоя с привлечением законов сопротивления и теплообмена на основе гипотезы Прандтля о длине пути смешения. Принимается двухслойная модель гидродинамического и теплового пограничных слоев. Использование параметрических методов расчета пограничного слоя Кутателадзе-Леонтьева позволяет получить соотношения для расчета профилей скорости и энтальпий. РЕЗУЛЬТАТЫ. Определено развитие интегральных толщин потока при сбросе тепловой нагрузки. Тепловая нестационарность при сбросе нагрузки по основному потоку деформирует профили температур, они становятся менее заполненными. Такая динамика вызывается ростом тепловой инерции термогазодинамической системы, блокированием потока тепловых волн в пограничный слой из-за падения фронта тепловой энергии с внешней стороны пограничного слоя. Термогазодинамическая система деформируется, отдавая энергию. Результатом подобных неуставившихся процессов является переход пограничного слоя к новому состоянию. Результаты обобщены в рамках теории пограничного слоя. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Толщина потери энергии увеличивается относительно своего стационарного изотермического аналога с ростом параметра тепловой нестационарности. Влияние нестационарности на толщину потери энергии лежит в пределах 20 % при  $z_h \leq 2$ ,  $Re_h^{**} = 1000$  и  $Re^{**} = 1000$ .

**Ключевые слова:** цилиндрический канал; высокотемпературный газ; тепловая нестационарность; толщины потери энергии; обобщение.

**Для цитирования:** Гильфанов К.Х., Гайнуллин Р.Н., Ахмадеев У.М., Гилязов Д.Р. Интегральные характеристики нестационарного теплового пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки в начальном участке цилиндрического канала // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 116-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-116-125.

## INTEGRAL CHARACTERISTICS OF A NON-STATIONARY THERMAL BOUNDARY LAYER AT THERMAL LOAD RELEASE IN THE INITIAL SECTION OF A CYLINDRICAL CHANNEL

Gilfanov K.H.<sup>1</sup>, Gainullin R.N.<sup>2</sup>, Akhmadeev U.M.<sup>1</sup>, Gilyazov D.R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>LLC «KER-Engineering», Kazan, Russia

kamil.gilfanov@yandex.ru

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To study the development of a non-stationary thermal boundary layer of a turbulent gas flow in the initial section of a cylindrical channel. *METHODS.* The study was carried out experimentally and by means of mathematical modeling. The experiments were carried out on a rig with plasma heating of the working fluid (air). The experimental rig is an open-loop wind tunnel. The experiments were carried out at Reynolds numbers  $Re_{01} = 44000$ . The gas temperature reached 1400 K, the wall temperature increased to 700 K. The fixation of temperature fields in the boundary layer is carried out by means of chromel-alumel thermoelectric sensors. The mathematical model represents the integral equations of the boundary layer. The laws of turbulent exchange are obtained in accordance with the Prandtl model on the length of the mixing path. A two-layer model of hydrodynamic and thermal boundary layers is adopted. The use of parametric methods for calculating the boundary layer of Kutateladze-Leontiev allows us to obtain relationships for calculating the velocity and enthalpy profiles. The parameters at the boundary of the thermal conductivity sublayer, enthalpy profiles, and integral characteristics of the thermal boundary layer are determined numerically. Within the framework of the adopted model, the integral characteristics are a function of the thermal non-stationarity parameter caused by the time variability of flow temperatures. *RESULTS.* The development of integral flow thicknesses during the release of the thermal load is determined. Thermal non-stationarity during the release of the load along the main flow deforms the temperature profiles, they become less filled. The results are generalized within the framework of the boundary layer theory. *CONCLUSIONS.* The energy loss thickness increases relative to its stationary isothermal analog with an increase in the thermal non-stationarity parameter. The effect of non-stationarity on the energy loss thickness is within 20% at  $z_h \leq 2$ ,  $Re_h^{**} = 1000$  and  $Re^{**} = 1000$ .

**Keywords:** cylindrical channel; high-temperature gas; thermal non-stationarity; energy loss thickness; generalization.

**For citation:** Gilfanov K.H., Gainullin R.N., Akhmadeev U.M., Gilyazov D.R. Integral characteristics of a non-stationary thermal boundary layer at thermal load release in the initial section of a cylindrical channel. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 116-125. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-116-125.

### *Введение (Introduction)*

Работа многих энергетических установок характеризуется нестационарностью температур теплоносителя и обтекаемой поверхности. Нестационарность может быть обусловлена, как спецификой функционирования, так и переходными процессами при изменении режима работы [1-3]. Также создание переменных теплофизических условий потока является способом управления интенсивностью теплообмена. В таких ситуациях важным является знание тепловой структуры потока [4-6]. Научная и практическая значимость работы заключается в исследовании тепловой структуры потока, интегральных характеристик нестационарного пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки в начальном участке цилиндрического канала.

Каждому тепловому состоянию системы должно соответствовать свое распределение температур в пограничном слое. Тепловая нестационарность деформирует поля температур в пристенной области [7-9]. Изменение во времени тех или иных параметров, определяющих состояние системы, приводит к образованию нового пограничного слоя, определяющегося другими, отличными от «старого» параметрами. Развитие во времени и пространстве характеристик системы и вызывает различные отклонения параметров от своего стационарного значения. Для инженерных

расчетов необходима информация о временных и пространственных тепловых параметрах потока [10, 11].

### **Материалы и методы (Materials and methods)**

В статье используется математическая модель на основе теории пограничного слоя. Принимается двухслойная модель гидродинамического и теплового пограничных слоев, состоящая пристенного вязкого подслоя, где влияние вязкости существенно и турбулентного ядра турбулентного пограничного слоя (ТПС). Во внешней области ТПС течение безвихревое (потенциальное), где влияние вязкости пренебрежимо мало. Предполагается, что тепловой пограничный слой также состоит из подслоя теплопроводности и конвективного ядра. Несмотря на свою малую толщину по сравнению с характерными внешними размерами обтекаемого тела, пограничный слой играет основную роль в гидродинамическом и тепловом взаимодействии потока с твердой поверхностью. В пограничном слое теплофизические параметры (скорости, температуры и концентрации) асимптотически приближаются к своим значениям в потенциальном потоке, что вносит неопределенность в определении толщины пограничного слоя. Общепринятым является подход, когда за толщину пограничного слоя принимается расстояние по нормали к поверхности, на котором величина теплофизического параметра отличается на 1 % от соответствующей величины во внешнем потоке. Такой подход является во многом условным, более объективным является использование интегральных толщин - вытеснения, потери импульса или энергии, поскольку они свободны от понятия толщины пограничного слоя, а определяются соответствующими функциональными профилями.

Для расчета подобного типа профилей необходимы законы сопротивления и теплоотдачи, для получения которых используются параметрические методы, предложенные С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьевым с привлечением модели пути смещения Прандтля [12, 13]:

Коэффициент теплоотдачи:

$$St = \frac{\int_{\omega_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\omega \int_{\vartheta_1}^1 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} d\vartheta}{\int_{\xi_1}^1 \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \frac{d\xi}{\chi\xi} \int_{\xi_{1h}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi\xi_h}}; \quad (1)$$

Энтальпия на границе подслоя теплопроводности:

$$\vartheta_1 = \text{PrRe}_h^{++} \frac{\delta}{\delta_h^{++}} St\xi_{1h} \left( 1 + \frac{Z_h \xi_{1h}}{2} \right); \quad (2)$$

Толщина подслоя теплопроводности:

$$\xi_{1h} = \eta_{1h} \left[ \text{Re}_h^{++} \frac{\delta}{\delta_h^{++}} \sqrt{St \left( 1 + \frac{Z_h \xi_{1h}}{2} \right)} \right]^{-1}; \quad (3)$$

Профиль плотности:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \varphi_h - (1 - \varphi_h)\vartheta \quad \text{или} \quad \frac{\rho}{\rho_0} = [\varphi_h - (1 - \varphi_h)\vartheta]^{-1}; \quad (4)$$

Безразмерная толщина потери тепловой энергии:

$$\frac{\delta_h^{++}}{\delta_h} = \int_0^1 \frac{\rho}{\rho_0} \omega (1 - \vartheta) (1 - \xi_h) d\xi_h; \quad (5)$$

Профиль безразмерных касательных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{\tau}}{\tau_0} &= 1 + \frac{\bar{\tau}'_w \xi}{1 + 2\xi}, \text{ при } \tau'_w = \frac{\partial \tau_w}{\partial \xi} \geq 0; \\ \frac{\bar{\tau}}{\tau_0} &= 1 + \frac{(1 + \bar{\tau}'_w) \xi}{1 - \xi} - \frac{(1 + \bar{\tau}'_w) \xi^d}{1 - \xi}, d = \frac{\bar{\tau}'_w}{1 + \bar{\tau}'_w}, \text{ при } \bar{\tau}'_w = \frac{\partial \tau_w}{\partial \xi} < -1 \end{aligned} \right\}; \quad (6)$$

Профиль безразмерных тепловых потоков:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{q}}{q_0} &= 1 + \frac{q'_w \xi_h}{1 + 2\xi_h}, \text{ при } \bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} \geq 0; \\ \frac{\bar{q}}{q_0} &= 1 + \frac{(1 + q'_w) \xi_h}{1 - \xi_h} - \frac{(1 + q'_w) \xi_h^{d_h}}{1 - \xi_h}, \quad d_h = \frac{q'_w}{1 + q'_w}, \text{ при } \bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} < -1 \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

Производная от тепловых потоков:

$$\bar{q}'_w = \frac{\partial \bar{q}_w}{\partial \xi_h} = z_h + \lambda_h - \frac{\delta_h}{r_0}; \quad (8)$$

Профиль энтальпий:

$$\vartheta_i = 1 - \text{St} \sqrt{\frac{2}{C_f}} \int_{\xi_{hi}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi \xi_h} - \frac{1 - \varphi_h}{4} \left( \text{St} \sqrt{\frac{2}{C_f}} \int_{\xi_{hi}}^1 \frac{\bar{q}}{q_0} \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \frac{d\xi_h}{\chi \xi_h} \right)^2. \quad (9)$$

В (1)  $\chi = 0,4$  – константа турбулентности (постоянная Кармана).

$\text{Re}_h^{**} = \frac{\rho_0 w_0 \delta_h^{**}}{\mu_0}$  – характерное число Рейнольдса по толщине потери энергии

теплового пограничного слоя.

Толщина подслоя теплопроводности (3) определяется численно, итерационным методом. Безразмерная толщина потери тепловой энергии (5) интегрируется методом Гаусса по профилю энтальпий (9).

В рамках принятой модели, согласно формуле (9), интегральные характеристики являются функцией тепловой нестационарности, обусловленной временной переменностью температур потока и обтекаемой поверхности и температурной неоднородностью  $\psi_h = h_w/h_0^*$ . На рисунке 1 представлена зависимость толщин потери энергии отнесенные к стационарным аналогам от параметра тепловой нестационарности.

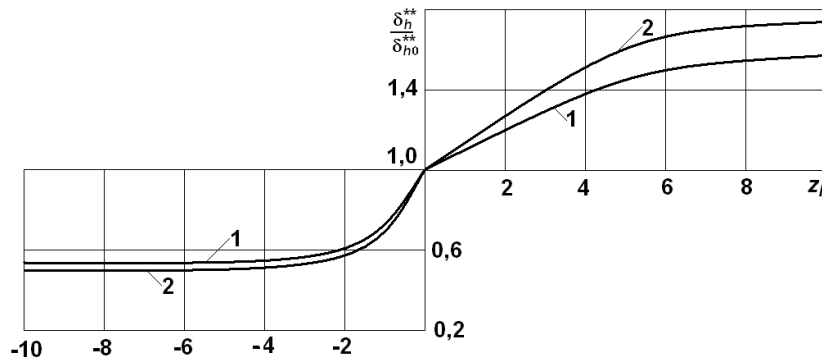


Рис. 1. Влияние тепловой нестационарности на относительные толщины потери энергии теплового пограничного слоя:

1 –  $\text{Re}_h^{**}=400$ ;  $\text{Re}^{**}=1000$ ;  $z=0$ ;  
2 –  $\text{Re}_h^{**}=3000$ ;  $\text{Re}^{**}=1000$ ;  $z=0$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 1. Effect of thermal unsteadiness on the relative energy loss thicknesses of the thermal boundary layer:

1 –  $\text{Re}_h^{**}=400$ ;  $\text{Re}^{**}=1000$ ;  $z=0$ ;  
2 –  $\text{Re}_h^{**}=3000$ ;  $\text{Re}^{**}=1000$ ;  $z=0$

**Экспериментальный стенд.** Для выполнения исследований по определению интегральных характеристик в условиях тепловой нестационарности была разработана экспериментальная установка на основе аэродинамической трубы разомкнутого типа с электродуговым плазмотроном, подробное описание которой представлено в работе [13].

Для создания нестационарных условий во время проведения экспериментов осуществлялось попеременное включение и выключение плазмотрона при неизменном массовом расходе рабочего тела. Включение плазмотрона моделирует пуск, а выключение – останов энергетической установки. При этом активная фаза работы плазмотрона составляла примерно 2 секунды. Выбор данного временного интервала режима активной работы плазмотрона был обусловлен, прежде всего, необходимостью

защиты датчиков температуры от перегрева и разрушения, сохранностью работоспособности датчиков температуры, которые, при более длительном времени его работы могли выйти из строя.

На рисунке 2 представлено временные и пространственные тренды температур потока и стенки, полученные при включении и выключении источника энергии.

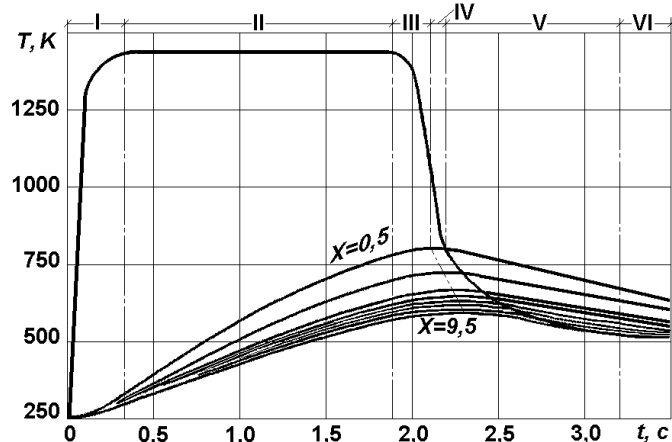


Рис. 2. Диаграмма температур основного потока и обтекаемой поверхности по времени и продольной координате

Fig. 2. Temperature diagram of the main flow and streamlined surface by time and longitudinal coordinate

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

После отключения источника энергии происходит постепенное снижение уровня температур как основного потока рабочего тела, так и стенки. На рисунке 2 этот временной интервал, который также называется участком сброса тепловой нагрузки, обозначен промежутком времени IV.

Деформация профиля температур в нестационарных условиях вызывается в основном знаком и абсолютной величиной параметра тепловой нестационарности  $z_h$ . Данная величина является весьма удобной для оценки эффектов нестационарности в теории пограничного слоя [12, 13]:

$$z_h = \frac{\delta_h}{St\psi_h w_0 (h_0^* - h_w)} \frac{\partial (h_0^* - h_w)}{\partial t}.$$

Значительный научный и практический интерес представляет ситуация, когда имеет место нестационарность, связанная с уменьшением температуры теплоносителя. В такой обстановке возможна перемена направления теплового потока, следовательно, изменение направления действия неизотермичности, оцениваемой энтальпийным фактором  $\psi_h$ .

### Результаты (Results)

При сбросе тепловой нагрузки по основному потоку рабочего тела параметр тепловой нестационарности  $z_h$  имеет положительный знак и наибольшую абсолютную величину в начальные после выключения плазматрона моменты времени. Это связано с максимальной скоростью снижения температурного напора. Согласно анализу в рамках теории [13] положительным параметрам тепловой нестационарности  $z_h$  должны соответствовать менее заполненные поля температур (энтальпий). Такая динамика влияния вызывается ростом тепловой инерции термогазодинамической системы, блокированием потока тепловых волн в пограничный слой из-за падения фронта тепловой энергии с внешней стороны пограничного слоя. Термогазодинамическая система деформируется, отдавая энергию. Результатом таких неустановившихся процессов является переход пограничного слоя к новому состоянию. Обратная ситуация происходит при набросе тепловой нагрузки (участок I на рис. 2). Пограничный слой в данном случае поглощает возрастающую энергию основного потока, соответственно параметр тепловой нестационарности  $z_h$  отрицателен.

Опыты проводились при числах Рейнольдса  $Re_{01} = 44000$ . В качестве рабочего тела использовался воздух. Для достижения оптимальных условий эксперимента по определению характеристик пограничного слоя при сбросе тепловой нагрузки время активной работы плазматрона устанавливалось около 2 секунд. Основной поток в таких условиях нагревался до 1400 К, Температура стенки повышалась до 700 К. При выключении электродугового нагревателя осуществлялся сброс тепловой нагрузки,

который приводил к уменьшения температуры газа со скоростью по абсолютной величине до 5000 К/с. Температура основного потока, уменьшаясь, становилась меньше температуры стенки, тем самым осуществлялась перемена направления фактора неизомермичности  $\psi_h$ . После выключения плазмотрона температура стенки некоторое время продолжала расти, затем постоянно уменьшалась. Скорость уменьшения температуры стенки составляла около 100 К/с.

Измерение профилей температур проводилось посредством термопарной гребенки, устанавливаемой на опытном цилиндрическом канале диаметром 45 мм (рис. 3). Трудности измерения температур в условиях эксперимента связаны с динамическими характеристиками термопар [14-16]. Рабочие концы ХА термопар 0,02 мм установлены расстоянии 0,2; 0,5; 1,2; 2,0; 3,6; 6,3; 10,0; 14,0; 18,0; 22,5 мм от стенки. Термопарная гребенка устанавливалась на расстоянии  $X=10,5$  калибров от входа. Постоянные времени термопар уменьшены до 0,003 с путем введения в измерительную цепь активного RC-звена. Выходные сигналы термопар подавались в измерительно-вычислительный комплекс.

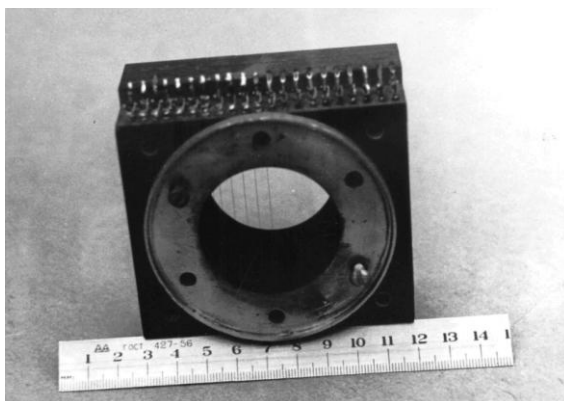


Рис. 3. Термопарная гребенка

Fig. 3. Thermocouple comb

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Обсуждение (Discussions)

Значения, полученные в результате измерений, использовались для построения следующих размерных (рис. 4) и безразмерных профилей температур (рис. 5):

$$T=f(y),$$

$$\theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = \varphi(y, t).$$

На графике рисунка 4 можно наблюдать «переворот» теплового пограничного слоя в момент времени 2,96 с в процессе уменьшения температуры основного потока. Данная временная точка характеризуется качественным изменением теплоотдачи, тепловой поток направляется от стенки к газу.

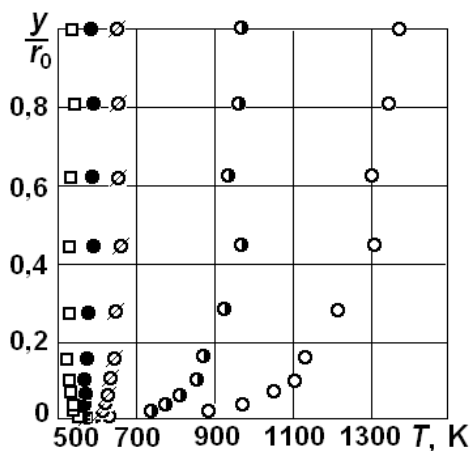


Рис. 4. Профиль температур при сбросе тепловой нагрузки:

Fig. 4. Temperature profile during heat load shedding:

○ – 2 с; ● – 2,12 с; ◻ – 2,6 с; ● – 2,96 с; ◻ – 3,44 с

○ – 2 с; ● – 2,12 с; ◻ – 2,6 с; ● – 2,96 с; ◻ – 3,44 с

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

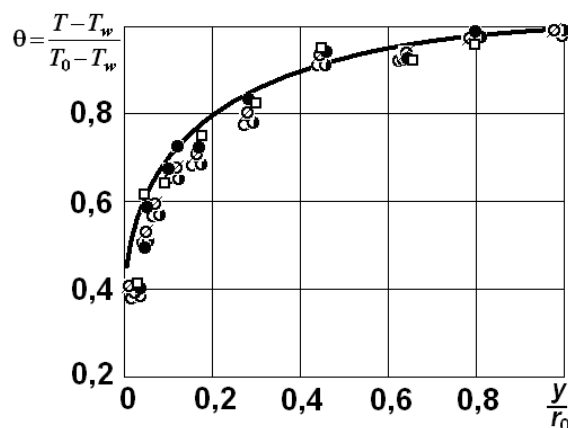


Рис. 5. Безразмерные профили температур при сбросе тепловой нагрузки температуры стенки. Временные точки по рис. 4.

Fig. 5. Dimensionless temperature profiles during wall temperature heat load shedding. Time points from Fig. 4.

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разброс точек связан с неопределенностью результата измерений температуры (погрешность по газу 0,9%, по стенке 4,0%). Анализ графиков на рисунках 4-5 позволяет констатировать меньшую заполненность профиля температур в начальные моменты времени. Примечательно, что в окрестности малых температурных напоров  $\Delta t = T_0 - T_w$  отклонение результатов от расчетных значительно возрастает. Это связано с повышением относительной погрешности, так как абсолютная погрешность измерения температуры становится соразмерной с разностью температур  $\Delta t$ .

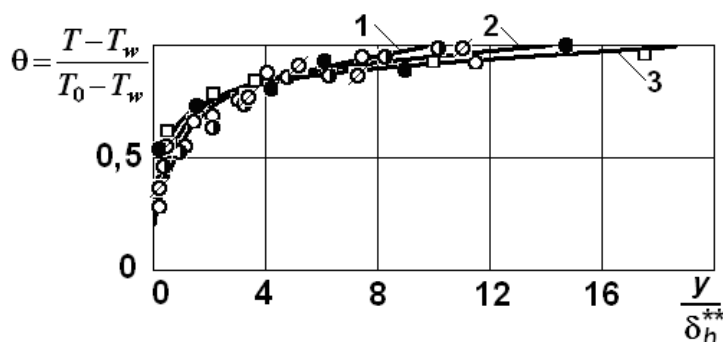


Рис. 6. Влияние тепловой нестационарности на профиль температур:

○ – 2 с; ● – 2,3 с; ◐ – 2,6 с; ● – 2,96 с; □ – 3,08 с.

Линии – расчет:

1 –  $z_h=2$ ;  $\psi_h=0,4$ ;  $Re_h^{**}=800$ ;

2 –  $z_h=0,5$ ;  $\psi_h=1,0$ ;  $Re_h^{**}=800$ ;

3 –  $z_h=0$ ;  $\psi_h=1,0$ ;  $Re_h^{**}=2000$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 6. Effect of thermal unsteadiness on the temperature profile:

○ – 2 с; ● – 2,3 с; ◐ – 2,6 с; ● – 2,96 с; □ – 3,08 с.

Lines – Calculation:

1 –  $z_h=2$ ;  $\psi_h=0,4$ ;  $Re_h^{**}=800$ ;

2 –  $z_h=0,5$ ;  $\psi_h=1,0$ ;  $Re_h^{**}=800$ ;

3 –  $z_h=0$ ;  $\psi_h=1,0$ ;  $Re_h^{**}=2000$

Определение толщины пограничного слоя всегда вызывает неоднозначность оценки, в то же время интегральные толщины пограничного слоя свободны от этого недостатка, что позволяет более наглядно обработать и представить результаты в координатах  $\theta = \theta(y/\delta_h^{**})$ . Толщина потери энергии вычисляется с учетом существенной неизотермичности и температурной неоднородности, и как следствие, неравномерной плотности. Результаты такой интерпретации и обработки данных для разных характерных чисел Рейнольдса представлены на рисунке 6. Линии рассчитаны по формулам (4-5) для условий, соответствующих эксперименту.

Увеличение параметра тепловой нестационарности приводит к меньшей заполненности профиля температур, причем повышение числа Рейнольдса снижает эту зависимость, ввиду повышения устойчивости пограничного слоя.

Зависимость относительной толщины потери энергии от параметра тепловой нестационарности при гидродинамическом числе Рейнольдса  $Re^{**}=1000$  представлена на рисунке 7. Значения толщин потери энергии  $\delta_h^{**}$  находились из расчета согласно [7].

Влияние температурной неоднородности учитывалось аналогично рисунку 6. Также приведены расчетные по методике [13] зависимости для соответствующих значений теплового и гидродинамического характерных чисел Рейнольдса.

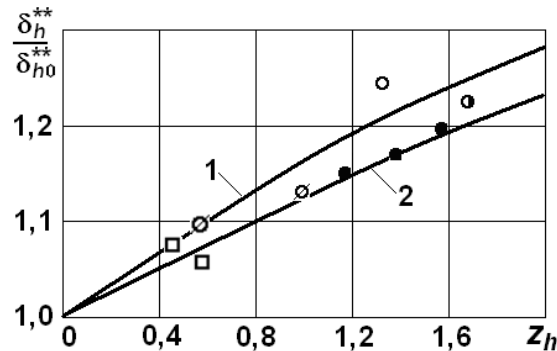


Рис. 7. Относительные толщины потери энергии в функции тепловой нестационарности:

Точки – эксперимент ○ – 2,03 с; ● – 2,06 с; ◻ – 2,36 с; ◼ – 2,12 с; ◻ – 2,45 с.

Линии – расчет:

1 –  $Re_h^{**}=2000$ ;  $Re^{**}=1000$

2 –  $Re_h^{**}=500$ ;  $Re^{**}=1000$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 7. Relative thicknesses of energy loss as a function of thermal unsteadiness:

Points – experiment ○ – 2,03 с; ● – 2,06 с; ◻ – 2,36 с; ◼ – 2,12 с; ◻ – 2,45 с.

Lines – Calculation:

1 –  $Re_h^{**}=2000$ ;  $Re^{**}=1000$

2 –  $Re_h^{**}=500$ ;  $Re^{**}=1000$

### Выводы (Conclusions)

Тепловая нестационарность при сбросе нагрузки по основному потоку деформирует профили температур, они становятся менее заполненными. Толщина потери энергии увеличивается относительно своего стационарного изотермического аналога с ростом параметра тепловой нестационарности. Влияние нестационарности на толщину потери энергии лежит в пределах 20% при  $z_h \leq 2$ ,  $Re_h^{**}=1000$  и  $Re^{**}=1000$ . Опытные данные количественно и качественно удовлетворительно согласуются с аналитическими расчетными результатами.

### Обозначения:

St - число Стантона;  $w_0$  – скорость основного потока, м/с;  $\delta_h$  – толщина теплового пограничного слоя, м;  $\psi_h = h_w/h_0^*$  – энтальпийный фактор;  $h$  – энтальпия, Дж/кг;  $\lambda_h$  – параметр продольного градиента энтальпии,  $Re^{**}$  – число Рейнольдса, построенное по толщине потери импульса;  $Re_h^{**}$  – число Рейнольдса, построенное по толщине потери энергии теплового пограничного слоя;  $t$  – время, с;

индексы:  $_0$  – параметры основного потока, параметр в стационарных условиях;  $_w$  – параметры на стенке,  $_h$  – тепловой;  $*$  – параметр торможения.

### Литература

1. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена - современное состояние проблемы (обзор) // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3-17.
2. Щукин А.В. и др. Теплофизика рабочих процессов в охлаждаемых лопатках газовых турбин // Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 392 с.
3. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Гайнуллин Р.Н., Коннов Ф.В. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования / Вестник Казанского государственного энергетического университета. Казань, КГЭУ, 2022, № 4 (55). -С. 80-91.
4. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023;25(6):54-66. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66>
5. Plotnikov L. V. Experimental Assessment of Flow Structure in a Cylinder During Air Flow Through Poppet Valves of Different Configurations / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 22 February 2024 Volume 97, pages 172–178, (2024)
6. Kornilov V. I., Shkvar E. A., Popkov A. N. Influence of Distributed Blowing-In on a Turbulent Boundary Layer on a Body of Revolution / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 14 February 2022, Volume 95, pages 132–141

7. Shchukin A.V. Film Cooling Efficiency on a Convex or Flat Surface in Conditions of Pulsed Blowing through Fan-Shaped and Cylindrical Holes / A.V. Il'inkov, A.V. Shchukin, V.V. Takmoltsev, and A.V. Starodumov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 3. – Pp. 309-314.
8. Shchukin A.V. Efficiency of a Heat Air Shield in the Case of Pulsed Blowing through a Slot at an Angle of 30 Degree / A.V. Il'inkov, V.V. Takmoltsev, A.V. Starodumov A.V. Shchukin, and A.L. Tukmakov// Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 2. – Pp. 386 - 392.
9. Tukmakov A.L. Model of Convective-Film Cooling of Plate with Flow Non-Stationarity and Gas Compressibility / A.L. Tukmakov, A.A. Akhunov, N.A. Tukmakova, and V.V. Khar'kov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 1. – Pp. 110 - 118.
10. Tan, B., Cai, J., Zhao, J., Hibiki, T., Tian, W. X. & Wu, Y. W. Experimental and theoretical study of vapor/air mixture condensation inside an inclined blind-end pipe in natural convection with considering fog formation / International Journal of Heat and Mass Transfer. 184, 122375, Mar 2022, In: DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375)
11. Pavlyukevich N. V., Shnip A. I. Modeling Heat Transfer in the Core of a Nuclear Power Reactor in the Presence of Perturbations of Hydrodynamic and Energy Parameters / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 14 February 2022 Volume 95, pages 29–36.
12. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое // -М.: Энергоатомиздат, 1985. -320 с.
13. Гильфанов К.Х., Якимов Н.Д., Минвалеев Н.Ю., Шешуков Е.Г., Богданова Н.В. Нестационарные трение и теплообмен в начальном участке трубопровода при сбросе тепловой нагрузки / Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2018, Т. 20 № 5-6, С. 22-28.
14. Володин Ю.Г., Гильфанов К.Х., Марфина О.П., Закиров И.Ф., Казаков А.А., Кузнецов А.Б., Рыжакова Ж.С. Экспериментальное исследование тепловой инерции микротермопар / Приборы. –2008. – № 4. – С. 52 – 55.
15. Гильфанов К.Х., Подымов В.Н., Минвалеев Н.Ю., Сибгатуллин И.Ф., Гайнуллин Р.Н. Амплитудно-фазовые частотные характеристики гидродинамических и тепловых параметров в коротком цилиндрическом канале / Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2014, № 11-12, С. 81-88.
16. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023;25(2):176-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186>.

#### Авторы публикации

**Гильфанов Камиль Хабибович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. E-mail: [kamil.gilfanov@yandex.ru](mailto:kamil.gilfanov@yandex.ru)

**Гайнуллин Рустем Нусратуллович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы сбора и обработки информации» Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Казань, Россия. E-mail: [gainullin@kstu.ru](mailto:gainullin@kstu.ru)

**Ахмадеев Урал Мансурович** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. E-mail: [ural.akhmadeev@mail.ru](mailto:ural.akhmadeev@mail.ru)

**Гилязов Дамир Рауфович** – главный инженер проекта ООО «КЭР-Инжиниринг», г. Казань, Россия. E-mail: [damir\\_gilyazov@mail.ru](mailto:damir_gilyazov@mail.ru)

#### References

1. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olympiev V.V. Industrial application of heat transfer intensification - the current state of the problem (review) // Teploenergetika. 2012. No. 1. pp. 3-17.
2. Shchukin A.V. et al. Thermophysics of working processes in cooled blades of gas turbines // Kazan: Publishing house of KNITU-KAI, 2020. 392 p.
3. Gilfanov K.H., Shakirov R.A., Gainullin R.N., Konnov F.V. Method of heat transfer intensification based on intelligent control of the operating characteristics of heat exchange equipment / Bulletin of the Kazan State Energy University. Kazan, KGEU, 2022, No. 4 (55). pp. 80-91.
4. Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating / News of Higher educational institutions. Energy problems. 2023;25(6):54-66. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-54-66>
5. Plotnikov L. V. Experimental Assessment of Flow Structure in a Cylinder During Air Flow

Through Poppet Valves of Different Configurations / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 22 February 2024 Volume 97, pages 172–178, (2024)

6. Kornilov V. I., Shkvar E. A., Popkov A. N. Influence of Distributed Blowing-In on a Turbulent Boundary Layer on a Body of Revolution / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 14 February 2022, Volume 95, pages 132–141

7. Shchukin A.V. Film Cooling Efficiency on a Convex or Flat Surface in Conditions of Pulsed Blowing through Fan-Shaped and Cylindrical Holes / A.V. Il'inkov, A.V. Shchukin, V.V. Takmoltsev, and A.V. Starodumov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 3. – Pp. 309-314.

8. Shchukin A.V. Efficiency of a Heat Air Shield in the Case of Pulsed Blowing through a Slot at an Angle of 30 Degree / A.V. Il'inkov, V.V. Takmoltsev, A.V. Starodumov A.V. Shchukin, and A.L. Tukmakov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – № 2. – Pp. 386 - 392.

9. Tukmakov A.L. Model of Convective-Film Cooling of Plate with Flow Non-Stationarity and Gas Compatibility / A.L. Tukmakov, A.A. Akhunov, N.A. Tukmakova, and V.V. Khar'kov // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67. – No. 1. – Pp. 110 - 118.

10. Tan, B., Cai, J., Zhao, J., Hibiki, T., Tian, W. X. & Wu, Y. W. Experimental and theoretical study of vapor/air mixture condensation inside an enclosed blind-end pipe in natural convection with considering fog formation / International Journal of Heat and Mass Transfer. 184, 122375, Mar 2022, In: DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122375

11. Pavlyukevich N. V., Shnip A. I. Modeling Heat Transfer in the Core of a Nuclear Power Reactor in the Presence of Perturbations of Hydrodynamic and Energy Parameters / Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Published: 14 February 2022 Volume 95, pages 29-36.

12. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. Heat and Mass transfer and friction in a turbulent boundary layer // -M.: Energoatomizdat, 1985. -320 p.

13. Gilfanov K.Kh., Yakimov N.D., Minvaleev N.Yu., Sheshukov E.G., Bogdanova N.V. Unsteady friction and heat transfer in the initial section of the pipeline during heat load discharge / Izv. vuzov. Problems of Energy, 2018, Vol. 20 No. 5-6, pp. 22-28.

14. Volodin Yu.G., Gilfanov K.H., Marfina O.P., Zakirov I.F., Kazakov A.A., Kuznetsov A.B., Ryzhakova J.S. Experimental study of thermal inertia of microthermoparks / Devices. -2008. – No. 4. – pp. 52-55.

15. Gilfanov K.H., Podymov V.N., Minvaleev N.Yu., Sibgatullin I.F., Gainullin R.N. Amplitude-phase frequency characteristics of hydrodynamic and thermal parameters in a short cylindrical channel / Izv. vuzov. Problems of Energy, 2014, No. 11-12, pp. 81-88.

16. Badretdinova G.R., Kalimullin I.R., Zinurov V.E., Dmitriev A.V. Evaluation of turbulence models in the external flow of a heated pipe / News of higher educational institutions. Energy problems. 2023;25(2):176-186. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186>

#### Authors of the publication

**Kamil H. Gilfanov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: [kamil.gilfanov@yandex.ru](mailto:kamil.gilfanov@yandex.ru)

**Rustem N. Gainullin** – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: [gainullin@kstu.ru](mailto:gainullin@kstu.ru)

**Ural M. Akhmadeev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: [ural.akhmadeev@mail.ru](mailto:ural.akhmadeev@mail.ru)

**Damir R. Gilyazov** – «KER-Engineering LLC», Kazan, Russia. E-mail: [damir\\_gilyazov@mail.ru](mailto:damir_gilyazov@mail.ru)

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** 10.12.2024 г.

**Отредактировано** 28.12.2024 г.

**Принято** 27.01.2025 г.