

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ВОЛОДИН, асп. К.С. ФЕДОРОВ, асп. М.В. ЯКОВЛЕВ

Выполнено экспериментальное исследование влияния нестационарности, вызванной резким увеличением температуры газового потока на величины локальных значений коэффициента теплоотдачи.

Accomplished experimental research under the influence of unsteady-state received at the rapid augment of the temperature in the gas flow on quantity of the local value coefficient heat transfer.

Для исследования пусковых режимов энергетической установки был создан экспериментальный стенд, представляющий собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа с электродуговым подогревом рабочего тела. Подробное описание экспериментального стенда, диагностического оборудования, метрологических характеристик средств измерения приведено в [1]. Опытный канал представлял собой цилиндрическую трубу диаметром $D = 45$ мм, выполненную из стали Х18Н9Т и составленную из отдельных секций длиной D с толщиной стенок 0,08 мм. Индуктивными датчиками давления ДМИ и хромель—копелевыми и хромель—алюмелевыми термопарами диаметром 40 мкм измерялись полное давление p_0^* и температура на входе в опытный канал T_0 , распределение по длине канала температуры стенок T_w , статического давления $\Delta p_{ст}$. Заданные температурные режимы обеспечивались перераспределением подачи холодного воздуха в форкамеру. Диапазон изменения числа Рейнольдса, построенного по среднерасходной скорости, составил $Re_1 = 30000 - 60000$, температуры рабочего тела — $T_0 = 293...1500$ К с градиентом температуры до 12000 К/с. Среднеквадратичные погрешности в определении температур и коэффициентов теплоотдачи составили 2,5 и 12 % соответственно.

Нестационарный характер течения реализовался в момент запуска плазмотрона при постоянном массовом расходе рабочей среды. С увеличением температуры газового потока T_0 на входе в опытный канал во время пуска плазмотрона наблюдался монотонный рост температур стенок T_w во всех измерительных сечениях канала. Темп прогрева стенок по длине опытного канала был различен и снижался с продвижением по направлению течения по мере увеличения толщины пограничного слоя.

Изменение плотности и вязкости исследуемой среды, вызванное увеличением температуры газа до 1500 К с градиентом изменения температуры на входе dT_0/dt до 12000 К/с, сопровождается увеличением скорости в потенциальной части потока w_0 .

Для рассмотрения влияния нестационарных эффектов на теплоотдачу запишем уравнение энергии для пристенной области [2]

$$-\frac{\partial q}{\partial y} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что в потенциальной области течения

$$\rho_0 \frac{\partial h_0^*}{\partial t} + \rho_0 w_0 \frac{\partial h_0^*}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

из уравнения (1) имеем параметр теплоотдачи

$$\bar{q}'_w = \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial \xi_h} \right)_w = z_h + \lambda_h - \frac{\delta_h}{r_0}. \quad (3)$$

где q — плотность теплового потока; ρ — плотность; δ_h — толщина теплового пограничного слоя; h — энтальпия; t — время; x — продольная координата; y — поперечная координата; $\xi_h = y/\delta_h$ — безразмерная поперечная координата; r_0 — радиус канала; w_0 — скорость потока;

$$z_h = - \left[\delta_h \frac{\partial}{\partial t} (h_0^* - h_w) \right] / \left[\text{St } w_0 \phi_h (h_0^* - h_w) \right] —$$

параметр тепловой нестационарности;

$$\lambda_h = - \delta_h \left(\frac{\partial h_0^*}{\partial x} \right) / \left[\text{St } \phi_h (h_0^* - h_w) \right] —$$

параметр продольного градиента энтальпии.

Индексы: h — тепловые параметры, 0 — параметры на оси потока, w — параметры на стенке.

Параметры динамической нестационарности z , продольного градиента давления λ могут быть получены аналогично из уравнения движения и согласно [2] имеем

$$z = - \left[2\delta / (C_f w_0^2) \right] \partial w_0 / \partial t, \quad (4)$$

$$\lambda = - \left[2\delta / C_f w_0 \right] \partial w_0 / \partial x, \quad (5)$$

где C_f — коэффициент трения, δ — толщина динамического пограничного слоя.

Значения параметров тепловой и динамической нестационарности, градиента давления и температурного фактора $\phi_h = T_w/T_0$ в целом претерпевают существенные изменения [1]. Температурный фактор монотонно уменьшается от 1 до 0,25. Параметр продольного градиента давления сохраняется практически без изменений. Параметры тепловой и динамической нестационарности в начальные моменты времени увеличиваются до экстремальных значений, а затем плавно уменьшаются. Характерным для исследуемого процесса является то, что параметр тепловой нестационарности быстрее параметра динамической нестационарности

достигает экстремального значения (рис. 1). При этом число Стантона $\text{St} = q_w / \rho_0 w_0 (h_0^* - h_w)$ и число Рейнольдса $\text{Re}_h^{**} = \delta_h^{**} w_0 / \nu$ во всех измерительных сечениях опытного канала интенсивно увеличиваются до момента времени $t = 0,05$ с и превышают значения своих квазистационарных аналогов, а затем уменьшаются (рис. 2). Изменение в начальные моменты времени вызвано преобладающим влиянием на тепловую и кинематическую структуры потока тепловой нестационарности. Ускорение потока становится определяющим в последующие моменты времени и ведет к снижению процессов теплообмена и соответственно к уменьшению числа Стантона более чем в 2 раза по отношению к квазистационарным значениям (рис. 2). Прямые 1 и 2 на графике представляют собой «стандартные» законы теплоотдачи для турбулентных и ламинарных режимов течения, принятые в соответствии с [3] в виде

$$\text{St}_{0\text{тур}} = 0,0128 / (\text{Re}_h^{**0,25} \text{Pr}^{0,75}), \quad (6)$$

$$\text{St}_{0\text{лам}} = 0,22 / (\text{Re}_h^{**} \text{Pr}^{1,33}). \quad (7)$$

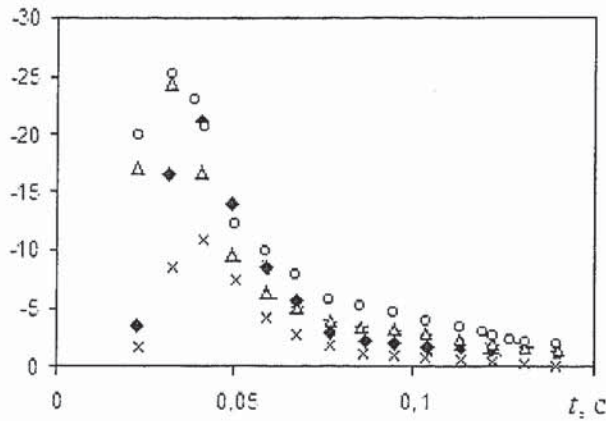


Рис. 1. Эволюция тепловых параметров во времени; $x = 2,5$, \blacklozenge — z , Δ — z_h ; $x = 10,5$ \circ — z_h

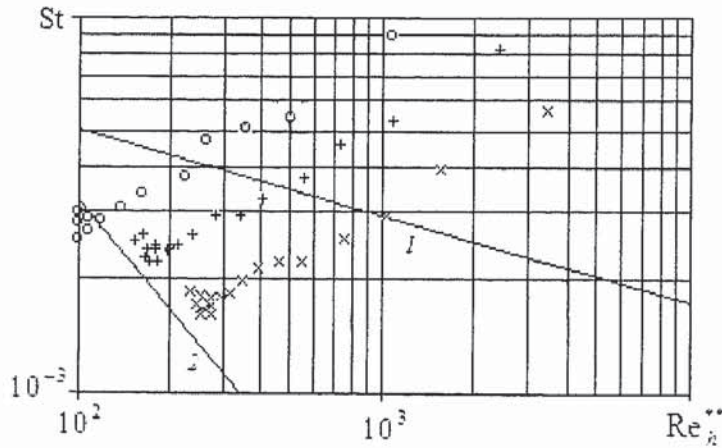


Рис. 2. Зависимость числа St от числа Re_h^{**} : \circ — $X = x/D = 2,5$; $+$ — $4,5$; \times — $6,5$;

$$1 - St_{0_{mnp}} = (Re_h^{**0,25} Pr^{0,75}); 2 - St = St_{0_{лам}} = 0,22 / (Re_h^{**} Pr^{1,33}).$$

По длине канала теплоотдача уменьшается во все моменты времени. Опытные точки с течением времени располагаются в области, характерной для ламинарных режимов течения.

Параметр ламинаризации турбулентного пограничного слоя (ТПС) K , учитывающий пространственное и временное ускорение потока, имеет вид

$$K = -\frac{v}{w_0^2} \frac{\partial w_0}{\partial x} - \frac{v}{w_0^3} \frac{\partial w_0}{\partial t} = K_x + K_t, \tag{8}$$

где v — кинематическая вязкость.

В этих условиях экспериментальные результаты обобщены в виде аппроксимационной зависимости в интервале времени от 0,03 с до 0,15с ($dT_0/dt > 0, T_0 = var$)

$$St = St_{0_{mnp}} |\bar{\tau}_w| \sqrt{\frac{1}{Re_h^{**} (h_0^* - h_w)} \frac{\partial (h_0^* - h_w)}{\partial t}}, \tag{9}$$

где $\bar{\tau}_w = z + \lambda$.

В интервале времени $t > 0,15с (dT_0/dt = 0, T_0 = const)$ имеет место стандартная зависимость для ламинарных потоков несмотря на то, что режим течения по среднерас-

ходному числу Рейнольдса (около 19000) определяется турбулентным,

$$St = St_{0,лам} = 0,22 / (Re_h^{**} Pr^{1,33}).$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в условиях больших температурных напоров ~ 900 К при пуске энергетической установки происходит ламинаризация ТПС, которую необходимо учитывать в расчетах тепловой нагрузки поверхностей теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Ю. Г., Федоров К. С., Яковлев М. В. Коэффициент трения в пусковом режиме энергетической установки // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — № 8. — С. 37—40.
2. Ф а ф у р и н А. В. Законы трения и теплоотдачи в турбулентном пограничном слое // Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов. Казань, Казанский авиационный ин-т. — 1979. — Вып. 2. — С. 62—69.
3. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.

621.436

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Д-р техн. наук, проф. В.А. МАРКОВ, инж. Е.Ф. ПОЗДНЯКОВ, асп. М.И. ШЛЕНОВ

Рассмотрены требования к системам автоматического регулирования частоты вращения дизельных двигателей. Разработан регулятор для дизель-генераторной установки, включающий последовательные корректирующие звенья. Проведены исследования дизель-электрического агрегата с регуляторами различных типов.

Requirements to systems of a rotational speed auto control applied to diesel drives are considered. The regulator for a diesel-generator drive which is powering up sequential correcting links is developed. Researches of a diesel-electric drive with regulators of different types are carried out.

Одним из наиболее важных параметров дизельных двигателей (далее дизелей), применяемых в дизель-генераторных установках (ДГУ), является частота вращения коленчатого вала. В электроагрегатах, вырабатывающих переменный электрический ток, к частоте вращения дизеля предъявляются достаточно жесткие требования. Этим обеспечиваются требования нормативных документов (ГОСТ или ТУ) к частоте переменного тока. Поэтому очень важно точно поддерживать скоростной режим работы дизеля, независимо от внешних нагрузок на электроагрегат, для чего двигатели оснащаются системой автоматического регулирования (САР) частоты вращения. Но и наличие такой системы не всегда обеспечивает необходимые статические и динамические показатели двигателя.

Наиболее значимыми показателями динамических качеств дизеля являются продолжительность (время) переходного процесса $t_{\text{п}}$ и заброс параметра (частоты вращения) в переходном процессе (перерегулирование) σ [1, 2]. Время переходного процесса $t_{\text{п}}$ определяется быстродействием САР. Заброс параметра в переходном процессе характеризуется перерегулированием σ , определяемым в виде отношения максимального отклонения регулируемой величины к ее установившемуся значению.