

УДК 532.526

DOI:10.46960/62045_2021_3_40

Ю.Г. Володин¹, Ю.И. Матвеев²
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ТРЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧИ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

¹*Казанский институт морского и речного флота им. Героя Советского Союза
М.П. Девятаева*

²*Волжский государственный университет водного транспорта*

Представлены результаты экспериментальных исследований трения и теплообмена в цилиндрической трубе, которая представляет собой имитационную модель жаровой трубы. Эксперименты выполнены на газодинамической трубе разомкнутого типа. Пусковой режим при эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) является одним из основных режимов, в котором порой возникают отказы. Экспериментальные исследования проводились при различных значениях интенсивности возрастания температуры рабочего тела, что позволило зафиксировать явление ламинаризации теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС) при тепловом потоке, направленном со стороны газового потока к стенке канала. При возникновении явления ламинаризации значения локальных коэффициентов теплоотдачи уменьшаются в 2,5-3 раза. В нестационарном режиме и указанном направлении теплового потока это явление обнаружено впервые. В качестве параметра ламинаризации ТПС предложен температурный напор ΔT или температурный фактор, а границей области ламинаризации ТПС является величина $\Delta T \geq 700$ К.

Ключевые слова: газовый поток, жаровая труба ГТД, коэффициенты трения и теплоотдачи, нестационарность, нестационарные эффекты, неизотермичность, температурный напор.

Введение

При работе газотурбинных двигателей пусковой режим является важнейшим из эксплуатационных режимов. В процессе пуска происходит резкое увеличение температуры газового потока за счет сгорания топлива и формирования этого потока из продуктов сгорания, при этом выделяется большое количество тепла. Таким образом, нагретый газовый поток устремляется из камеры сгорания через жаровую трубу к турбине. Также стремительно нагреваются отдельные детали и узлы двигателя, обтекаемые этим газовым потоком. Что в это время происходит в жаровой трубе, когда формируются нестационарные эффекты? Как эти эффекты, неизотермичность и продольный градиент давления влияют на кинематическую и тепловую структуры потока, локальные значения коэффициентов трения C_f и теплоотдачи St , являющиеся одними из важнейших параметров, отражающих газодинамику течения и протекание теплообменных процессов? В качестве имитационной модели использована тонкостенная цилиндрическая труба. Рассмотрено совместное влияние неизотермичности и нестационарности при течении газового потока на начальном участке цилиндрического канала при резком увеличении температуры газового потока и далее сформировавшемся температурном напоре.

Экспериментальный стенд

Эксперименты выполнялись на газодинамическом стенде разомкнутого типа (рис. 1). Для достижения необходимой динамики изменения температуры рабочего тела и соответствующих величин его температуры использовался плазмотрон 1, который собран по однокамерной схеме. Стабилизация дуги в плазмотроне обеспечивалась вихревой круткой дуги

при тангенциальном входе рабочего тела через отверстие в обойме из органического стекла, в которую справа и слева вкручивались анод и катод. В качестве рабочего тела использовался сжатый воздух, к которому примешивалось небольшое количество 1,5-2 % аргона для стабилизации дуги и уменьшения эрозии катода. На выходе из плазмотрона к фланцу монтировалась форкамера 2 с выравнивающими решетками 3 [1-5]. На входе в опытный канал 4 необходимо равномерное распределение скоростей и температур, которое достигалось использованием выравнивающих решеток 3 и пристыкованного к выходу форкамеры 2 сопла, спрофилированного по кривой Витошинского [1-5]. В результате по профилям скоростей и температур w_{1cp}/w_{1max} и T_{1cp}/T_{1max} были получены коэффициенты искажения величиной не менее 0,97. К выходному фланцу сопла крепился опытный канал 4, представляющий собой цилиндрическую трубу. Изготовлена труба из нержавеющей стали диаметром $D = 45$ мм. Труба составлена из отдельных секций длиной D и толщиной стенок 0,08 мм. Для измерения давлений применялись индуктивные датчики давления ДМИ, а температуры измерялись хромель-копелевыми и хромель-алюмелевыми термопарами. Датчиками давления ДМИ измерялись полное давление p_0^* в форкамере, в измерительных сечениях, расположенных в середине секции, по длине канала через каждые два калибра – динамический напор на оси канала, статическое давление $\Delta p_{ст}$ и пристенные касательные напряжения трения τ_w [2-7]. Хромель-копелевыми микротермопарами 5 диаметром 40 мкм измерялись в измерительных сечениях температуры стенок T_w канала. Хромель-алюмелевой микротермопарой 6 диаметром 40 мкм измерялась температура T_0 на входе в опытный канал, которая изменялась в диапазоне $T_0 = 293-1500$ К с градиентом температуры до 12 000 К/с. Собранный информация с датчиков давления ДМИ и микротермопар через модули аналогового ввода ADAM 4019 и RS – 232/485 поступала в компьютер PC.

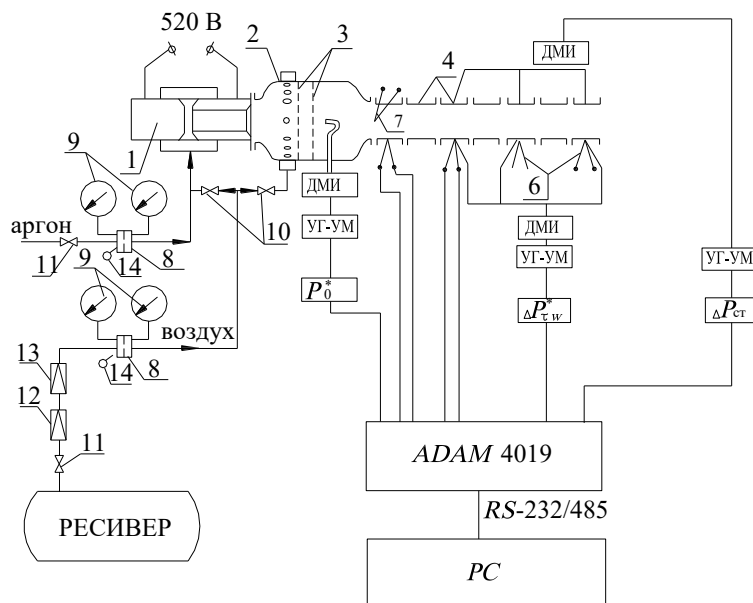


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Необходимая в экспериментах величина температуры рабочего тела достигалась перераспределением подачи части холодного воздуха в форкамеру через двенадцать радиальных отверстий минуя плазмотрон. Для измерения расходов воздуха и аргона применялись расходомеры 7 переменного перепада давления. Были проведены исследования [2, 3, 7] метрологических характеристик средств и систем измерения, которые показали, что во всем диапазоне измерений по амплитуде и фазе искажений не имеется. Среднеквадратичные погрешности измерения температуры, скорости потока, коэффициентов трения и теплоотдачи в опытах не превысили 0,75, 1,6, 9,2 и 9,5 % соответственно.

Результаты экспериментальных исследований

Эксперименты по исследованию пускового режима проводились на имитационной модели при постоянстве массового расхода рабочего тела. Резкое увеличение температуры газового потока T_0 (рис. 2) обеспечивалось включением плазмотрона. На входе в опытный канал (имитационная модель) изменяется величина температуры газового потока T_0 , интенсивно прогреваются стенки канала и увеличивается во времени скорость газового потока в результате изменения плотности и вязкости рабочего тела. Переменность во времени параметров потока формирует условия для разных видов нестационарности. Тепловая нестационарность в опытах при постоянстве массового расхода обуславливается увеличением температуры газового потока T_0 на входе в опытный канал при пуске плазмотрона (рис. 2) и сопровождается монотонным прогревом температур стенок T_w во всех измерительных сечениях канала. Темп прогрева стенки по длине опытного канала различен и снижается с продвижением по направлению течения по мере увеличения толщины пограничного слоя. Динамическая нестационарность формируется переменностью во времени скорости газового потока (рис. 2).

Нестационарные эффекты

Интенсивный рост температуры T_0 газового потока (рис. 2) вызывает такое же интенсивное уменьшение плотности ρ_0 и увеличение вязкости μ_0 рабочей среды, вследствие чего увеличивается скорость w_0 потока вне пограничного слоя. Увеличение температуры T_0 и скорости w_0 потока более чем в 3 раза за короткий промежуток времени приводит к образованию временных производных температуры $dT_0/dt = 12000 \text{ K/c}$ и скорости $dw_{01}/dt = 700 \text{ м/с}^2$. Это означает, что процесс теплоотдачи в интервале роста температуры T_0 теплоносителя протекает при одновременном, проявлении эффектов тепловой и динамической нестационарности и уменьшении величины числа Re (рис. 2).

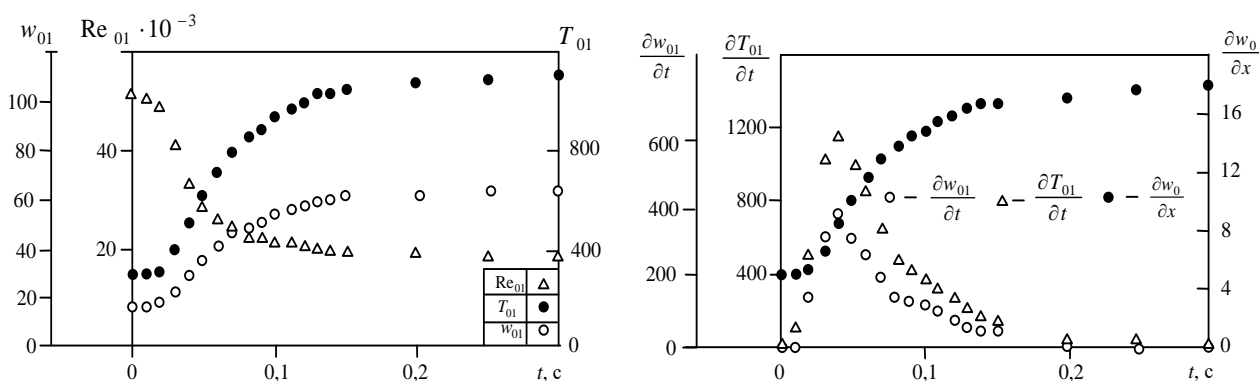


Рис. 2. Изменения во времени начальных условий

Для удобства проведения анализа в области экспериментального исследования выделим две временные зоны. Первая продолжительностью от 0 до 0,15 с (рис. 2). В рассматриваемом интервале времени комплекс, $(1/w_0^2)(\partial w_0/\partial t)$, определяющий параметр динамической нестационарности z , достигает максимальных значений. При этом температурный фактор $\psi_h = T_w/T_0$, уменьшается от 1 до 0,25. Производная, формирующая параметр продольного градиента давления, в рассматриваемом интервале времени увеличивается более чем в 4 раза. Однако, комплекс $(1/w_0)(\partial w_0/\partial x)$, определяющий параметр продольного градиента давления, в функции времени по величине практически не изменяется, увеличиваясь лишь по длине канала. Из анализа совместных изменений величин комплексов следует, что действие отрицательного продольного градиента давления приводит к уменьшению параметра неста-

циональности z и ослаблению нестационарных эффектов вниз по течению по мере нарастания пограничного слоя в цилиндрических каналах и, следовательно, в каналах конфузорного типа. Здесь же обращает на себя внимание другой факт, связанный с производной $\partial w_0/\partial x$ (рис. 2). Изменение ее величины во времени формирует еще один вид нестационарности, определяемый производной $\partial(\partial w_0/\partial x)/\partial t$, а кроме того вторая производная $\partial(\partial w_0/\partial t)/\partial t$ (рис. 2) и изменение температурного фактора во времени, определяемое производной $(\partial\psi_h/\partial t)$, также являются источниками нестационарных эффектов. При этом экстремальные значения все производные принимают в одно и то же время. Производная dT_0/dt формирует параметр тепловой нестационарности. 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. 2).

Вторая временная область характеризуется постоянством температуры газового потока, поэтому все временные производные равны нулю, а нестационарные эффекты отсутствуют. В этой области интенсивнее увеличивается температура стенок канала, при этом величина температурного фактора начинает возрастать, стремясь к 1. Здесь возможно проявление нестационарности за счет переменности температуры стенки во времени.

Коэффициент трения

Ускорение потока, вызванное нестационарностью и неизотермичностью (т.е. при уменьшении z и ψ_h), сопровождается увеличением величин пристеночных касательных напряжений трения τ_w . В наших опытах наибольших значений τ_w достигает в момент времени $t = 0,04$ с, при котором все производные по времени dT_0/dt , $\partial w_0/\partial t$, $\partial(\partial w_0/\partial x)/\partial t$, $\partial(\partial w_0/\partial t)/\partial t$, $(\partial\psi_h/\partial t)$ и, соответственно, параметры нестационарности $|z|$ максимальны. Во все моменты времени величина пристеночных касательных напряжений трения по длине канала уменьшается вниз по течению. В рассматриваемой ситуации величина коэффициента трения C_f (рис. 3) увеличивается во всех измерительных сечениях опытного канала и экспериментальные точки располагаются выше линии, представляющей «стандартный» закон трения, определяемый выражением [9]:

$$(C_{f_0}/2) = (0,0128/Re^{**0,25}). \quad (1)$$

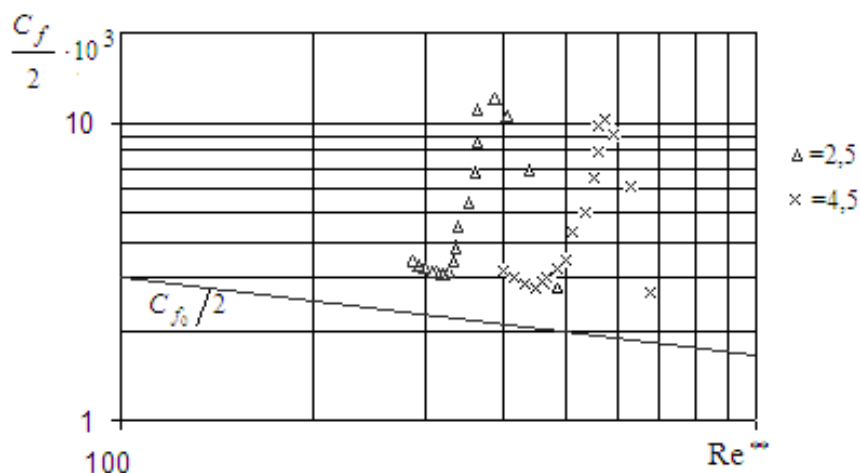


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от числа Re

Коэффициент трения во всех измерительных сечениях увеличивается до момента времени 0,04 с, а затем плавно уменьшается. К моменту времени $t = 0,15$ с нестационарный процесс можно считать законченным. В интервале $t > 0,15$ с, который характеризуется тем-

пературным напором $\sim 700 \text{ K}$, опытные значения C_f располагаются около «стандартной» зависимости и несколько выше. Это отклонение объясняется воздействием на поток неизоэнергичности. Учет этого фактора позволяет отклонившиеся от «стандартной» зависимости точки (рис. 3) в интервале времени $t > 0,15 \text{ с}$ сгруппировать около «стандартной» зависимости в пределах точности эксперимента. Следует также отметить консервативность коэффициента трения C_f к дестабилизирующим воздействиям (нестационарность) с увеличением числа Рейнольдса Re^{**} . В интервале времени от 0 до 0,15 с результаты эксперимента аппроксимированы с погрешностью 10 % зависимостью

$$(C_f/C_{f_0}) = 1 - 0,635z - 0,0375z^2. \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи

В работах [2-5, 10-15] показано, что уменьшение числа Re стимулирует проявление нестационарных эффектов, а тепловая и динамическая нестационарность оказывают взаимно противоположное влияние на теплоотдачу [10-11]. В условиях рассматриваемого воздействия нестационарных эффектов наблюдается первоначальное в 2-2,5 раза возрастание коэффициента теплоотдачи St относительно квазистационарного значения (прямая 1, рис. 4) во всех измерительных сечениях экспериментального канала. Изменение в начальные моменты времени вызвано преобладающим влиянием на структуру потока тепловой нестационарности и в интервале времени до 0,06 с величина коэффициента теплоотдачи превышает значения своих квазистационарных аналогов. Сформировавшаяся в течение первого временного интервала величина температурного напора при постоянной скорости прогрева стенки канала приводит к снижению интенсивности процессов теплообмена и соответственно к уменьшению числа Стантона, происходящее во всех измерительных сечениях экспериментального канала по параллельным лучам 3 (рис. 4). Отсутствие опытных данных в интервале времени 0-0,02 с на рис. 4 связано с незначительным изменением температуры газа и стенок канала, которое при определении величин тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи приводит к большим погрешностям.

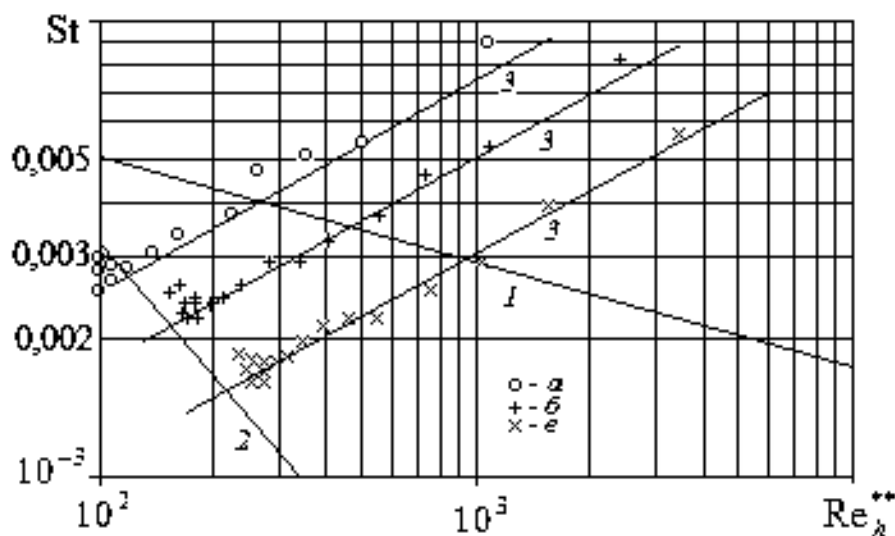


Рис. 4. Зависимость числа St от числа Re_h^{**} ; $a - X = 2,5$; $б - X = 4,5$; $в - X = 6,5$;
 $1 - St_0 = (0,0128/Re_h^{**0,25}Pr^{0,75})$; $2 - St_{0\text{лам}} = (0,22/Re_h^{**}Pr^{4/3})$; $3 -$ по зависимости (3)

Экспериментальные результаты по теплоотдаче при резком возрастании температуры рабочего тела обобщены аппроксимационной зависимостью вида

$$St = St_0 \sqrt{[1/Re_h^{**}(T_0 - T_w)][d(T_0 - T_w)/dt]}. \quad (3)$$

К моменту времени $t = 0,15$ с нестационарный процесс теплоотдачи закончен и в интервале $t > 0,15$ с, который характеризуется температурным напором более 700 К, опытные точки группируются около прямой 2, представляющей собой «стандартный» закон теплоотдачи для ламинарных режимов течения. Среднерасходное число Re достигает величины $18\ 800$ и определяет режим течения турбулентным. Таким образом, с достижением температурой потока постоянной величины сформировались условия, при которых происходит ламинаризация теплового турбулентного пограничного слоя (ТПС).

Выводы

Резкое увеличение температуры рабочего тела в пусковом режиме энергетической установки сопровождается проявлением ряда нестационарных эффектов, формирующих динамическую и тепловую нестационарность, воздействие которых на коэффициенты трения и теплоотдачи неоднозначно. По окончании воздействия нестационарности с достижением температурой рабочего тела постоянной величины определяющим условием теплоотдачи становится температурный напор, в результате действия которого происходит ламинаризация теплового ТПС. Расчет коэффициентов теплоотдачи при этом необходимо выполнять по зависимостям для ламинарных режимов течения, несмотря на то, что режим течения рабочего тела определяется турбулентным по числу Re . Динамический пограничный слой и коэффициент трения в рассмотренных условиях остаются консервативными, а величина C_f определяется по зависимостям для турбулентных режимов движения рабочих сред.

Библиографический список

1. **Повх И.Л.** Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1974. – 479 с.
2. **Володин, Ю.Г.** Нестационарность и ламинаризация ТПС в пусковых режимах энергетических установок / Ю.Г. Володин, М.В. Яковлев. – Санкт-Петербург. Изд. «Инфо-да», 2008. – 160 с.
3. **Володин, Ю.Г.** Теплоотдача и трение в пусковых режимах энергетических установок / Ю.Г. Володин, К.С. Федоров. – Санкт-Петербург: «Инфо-да». 2009. – 132 с.
4. **Volodin Y., Fedorov K., Yakovlev M.** Aircraft and rocket engine theory: Unsteady effects and friction in the starting regime of power plants // Russian Aeronautics – 2006 – № 49(1) – p. 49-52.
5. **Volodin Y., Fedorov K., Yakovlev M.** Nonstationary effects and heat exchange in starting conditions of power plants // Russian Aeronautics. 2006, № 49(4). Pp. 63-68.
6. **Володин, Ю.Г.** Измерение касательных напряжений трения в нестационарном газовом потоке / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина, А.Н. Богданов, М.С. Цветкович, А.Б. Кузнецов // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 34-36.
7. **Володин, Ю.Г.** Исследование тепловой инерционности микротермопар / Ю.Г. Володин, И.Ф. Закиров, К.С. Федоров. М.В. Яковлев // Датчики и системы. 2007. № 6. С. 33-35.
8. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
9. **Кутателадзе, С.С.** Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутеладзе, А.И. Леонтьев. – М.: Энергия, 1972. – 342 с.
10. **Володин, Ю.Г.** Расчет коэффициентов трения и теплоотдачи при нестационарном неизотермическом течении несжимаемого газа в осесимметричных каналах / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина // Известия ВУЗов «Машиностроение». 2007. № 3. С. 21-26.
11. **Володин, Ю.Г.** Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина. – СПб.: «Инфо-да», 2007. – 128 с.

12. **Volodin, Y.** Nonsteady transfer of heat in the initial segment of a cylindrical tube // *Journal of Engineering Physics*. – 1989 – № 57(4) – p. 1166-1168.
13. **Volodin, Y.** Experimental study of unsteady heat transfer in a convergent channel // *Heat transfer. Soviet research* – 1991 – № 23(1) – p. 71-77.
14. **Volodin Y.** Unsteady effects and heat-transfer when starting up power plant // *Thermal Engineering* – 2007 – № 54(5) – p. 399-402.
15. **Володин, Ю.Г.** Границы применения математической модели нестационарного течения несжимаемого газа в осесимметричных каналах / Ю.Г. Володин, О.П. Марфина // *Вестник Казанского технологического университета*. 2016. Т 19. № 6. С. 130-134.