

Определение потерь механической энергии при смешении потоков в ТРДД

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

В данной статье с помощью обобщенного уравнения Бернулли и гипотезы о политропности процессов в смешивающихся струях получена формула для определения потерь механической энергии потока, переходящих в теплоту. Это позволило определить величину работы, совершаемой высокоскоростной струей, по увеличению кинетической энергии низкоскоростной струи. Выполнены расчеты смешения изотермических и неизотермических дозвуковых струй в цилиндрической камере смешения при условии отсутствия трения на ее стенках при разных соотношениях скоростей смешивающихся потоков. Показано соответствие полученных результатов физическим представлениям о процессе смешения. Выполнено сравнение потерь механической энергии в виде тепла и работы, затрачиваемой высокоскоростной струей на увеличение кинетической энергии низкоскоростной струи, на разных режимах работы камеры смешения.

Ключевые слова: потери механической энергии, ТРДД, процесс смешения.

1. Введение и формулирование проблемы

Выбор оптимальной степени повышения давления вентилятора ТРДД в наружном контуре $\pi_{\text{вНонт}}^*$ зависит от потерь располагаемой (свободной) работы при разделении потоков (передаче работы в наружный контур из внутреннего) и при смешении потоков в камере смешения перед соплом [1,2]. В связи с этим актуальна задача определения потерь механической энергии при смешении потоков в камере смешения ТРДД.

В работе [1] потери при смешении потоков оцениваются как разность располагаемых работ расширения на входе и выходе камеры смешения. Однако располагаемая работа зависит от давления окружающей среды, поэтому при неизменности рабочего процесса в камере смешения потери располагаемых работ оказываются разными. Поэтому вместо располагаемых работ расширения необходимо использовать параметр, однозначно связанный с рабочим процессом в камере смешения. Таким параметром могут быть потери механической энергии, переходящие в теплоту.

Целью данной работы разработка метода расчета потерь механической энергии при смешении потоков, переходящих в теплоту.

2. Расчетные соотношения

Метод расчета потерь механической энергии смешивающихся струй основан на использовании обобщенного уравнения Бернулли в сочетании с гипотезой о политропности процессов в каждой из смешивающихся струй.

Рассматриваемая камера смешения ТРДД изображена на рис. 1.

Для расчета потерь механической энергии при смешении течение представляется в виде двух струй, которые обмениваются между собой энергией в виде теплоты и работы. Причем начальные и конечные параметры струй известны (рис. 2).

Вследствие разности скоростей струй и наличия вязкости на поверхности

взаимодействия струй имеется сила трения. При взаимодействии струй более высокоскоростная струя теряет часть механической энергии вследствие переноса энергии от одной струи к другой (L^*) и потерь механической энергии переходящей в теплоту (L_{rCM}).

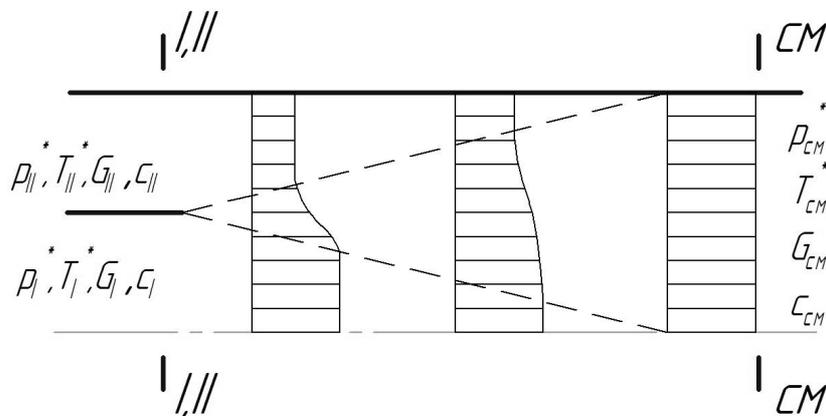


Рис. 1. Схема камеры смешения ТРДД

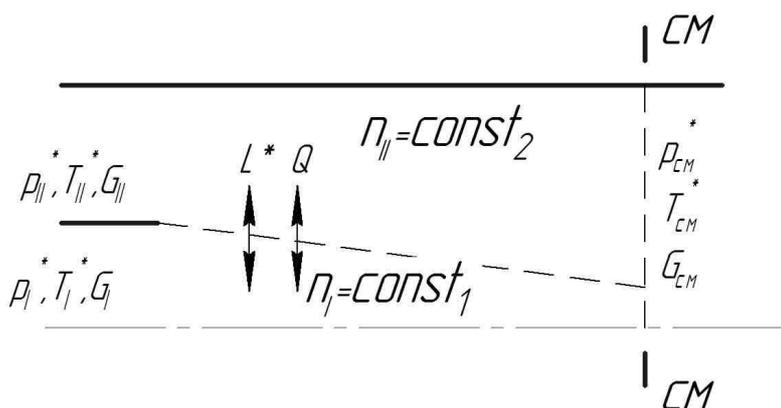


Рис. 2. Схематизация течения в камере смешения

Для каждой струи можно записать обобщенное уравнение Бернулли:

$$-\int_I^{CM} \frac{dp}{\rho} = L_I^* + \frac{c_{CM}^2 - c_I^2}{2} + L_{rI}, \quad (1)$$

$$-\int_{II}^{CM} \frac{dp}{\rho} = L_{II}^* + \frac{c_{CM}^2 - c_{II}^2}{2} + L_{rII}, \quad (2)$$

где L_I^*, L_{II}^* - удельные работы подводимые (отводимые) к соответствующим струям от соседней струи, а L_{rI}, L_{rII} - удельные работы сил трения, переходящие в теплоту.

Очевидно, что $L_I^* = -mL_{II}^*$, где $m = \frac{G_{II}}{G_I}$ - степень двухконтурности.

После умножения уравнения (2) на m и сложения его с уравнением (1), получаем:

$$-\int_I^{cm} \frac{dp}{\rho} + m \cdot \left(-\int_{II}^{cm} \frac{dp}{\rho} \right) = \frac{c_{cm}^2 - c_I^2}{2} + m \cdot \frac{c_{cm}^2 - c_{II}^2}{2} + (L_{rI} + mL_{rII}). \quad (3)$$

Здесь $L_{rI} + mL_{rII}$ - работа сил трения, переходящая в теплоту, приходящаяся на $(1+m)$ килограмм потока.

С учетом того, что в политропном процессе $\int_1^2 \frac{dp}{\rho} = -\frac{n}{n-1} R(T_2 - T_1)$,

удельная работа сил трения, переходящая в теплоту при смешении потоков, определяется по формуле:

$$L_{rcm} = \frac{1}{1+m} \left[-\frac{n_I}{n_I-1} R(T_{cm} - T_I) + m \left(-\frac{n_{II}}{n_{II}-1} R(T_{cm} - T_{II}) + \left(\frac{c_I^2}{2} + m \frac{c_{II}^2}{2} \right) - (1+m) \frac{c_{cm}^2}{2} \right) \right] \quad (4)$$

Показатели политроп n_I и n_{II} определяются из уравнений политроп в виде:

$$\frac{p_{cm}}{p_I} = \left(\frac{T_{cm}}{T_I} \right)^{\frac{n_I}{n_I-1}} \quad \text{и} \quad \frac{p_{cm}}{p_{II}} = \left(\frac{T_{cm}}{T_{II}} \right)^{\frac{n_{II}}{n_{II}-1}}.$$

Поскольку работу трения совершает струя с большей скоростью, то, при отсутствии трения о стенки канала, у низкоскоростной струи $L_r = 0$.

Это позволяет определить L^* менее скоростной струи из обобщенного уравнения Бернулли (уравнения (1) или (2) в зависимости от соотношения скоростей потоков). Для потока с большой скоростью L^* определяется из соотношения $L_I^* = -mL_{II}^*$.

3. Результаты расчета

Для оценки величины потерь механической энергии при смешении потоков рассмотрено изотермическое и неизотермическое смешение в цилиндрической камере, при отсутствии трения на стенках канала при разных соотношениях скоростей потоков на входе в камеру смешения. Для такой задачи существует точное решение уравнений неразрывности, энергии и количества движения, позволяющее определить параметры потока на выходе из камеры смешения [1,2]. По параметрам струй на входе и выходе камеры смешения определяются показатели политроп, а затем и L_{rcm} , L_I^* , L_{II}^* .

На рис. 3 - 5 представлено влияние соотношения скоростей потоков на L_{rcm} , L_I^* , L_{II}^* , $(L_{rcm} + L^*)$ при смешении струй с одинаковой температурой ($T_I = T_{II} = 400K$) с $m = 5,9$. Здесь $(L_{rcm} + L^*)$ - потери механической энергии высокоскоростной струи (увеличение кинетической энергии низкоскоростной струи и работа трения, переходящая в тепло).

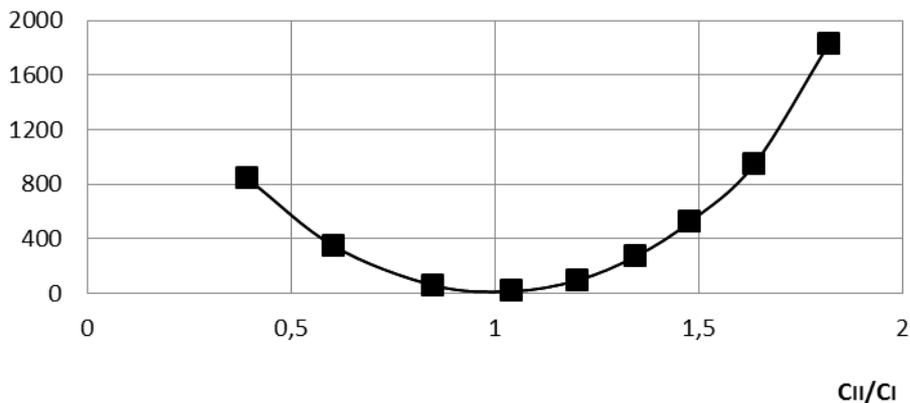


Рис. 3. Влияние соотношения скоростей потоков на L_{rcm}

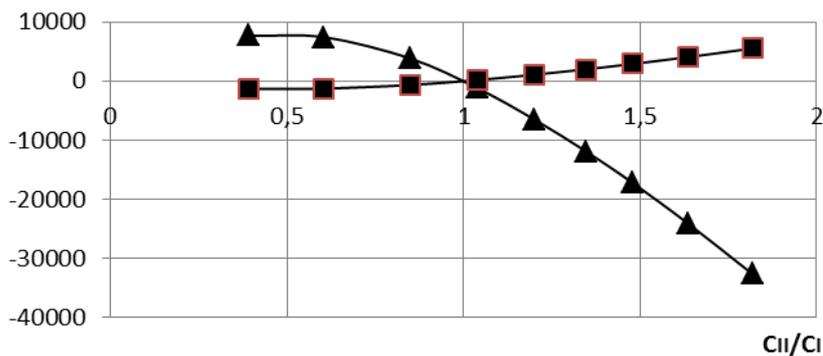


Рис. 4. Влияние соотношения скоростей потоков на L_I^* , L_{II}^*

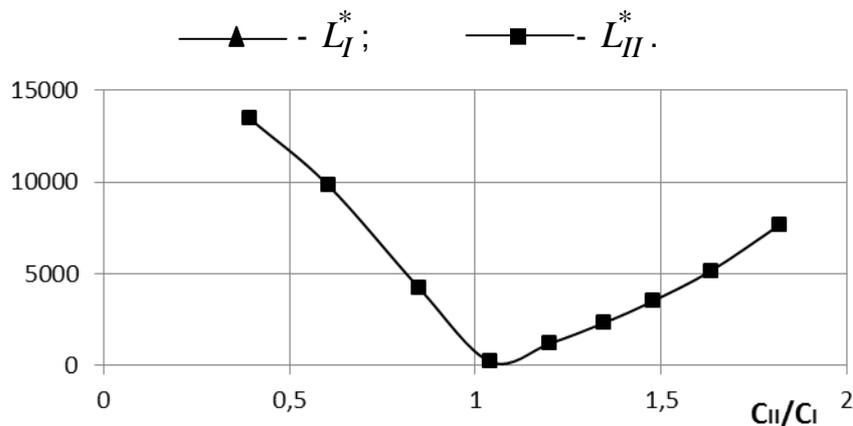


Рис. 5. Влияние соотношения скоростей потоков на суммарную работу $(L_{rcm} + L^*)$, совершаемую высокоскоростной струей (увеличение кинетической энергии низкоскоростной струи и работа трения, переходящая в тепло)

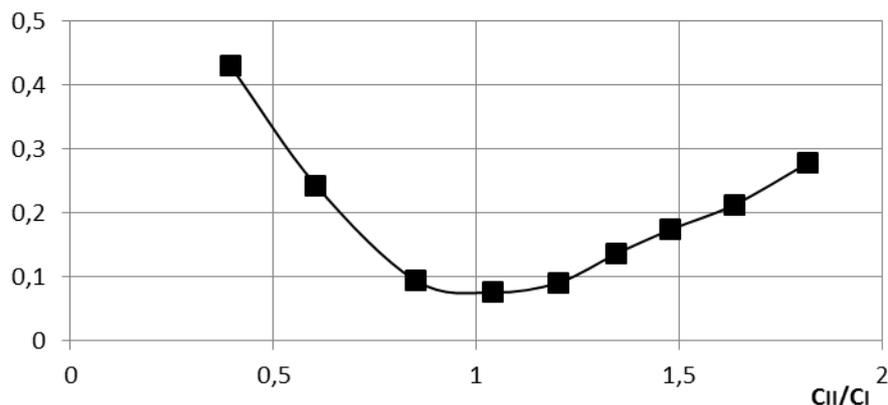


Рис. 6. Отношение диссипации механической энергии к потерям механической энергии высокоскоростной струи $\frac{L_{rsm}}{L_{rsm} + L^*}$

На рис. 6 представлено отношение диссипации механической энергии к потерям механической энергии высокоскоростной струи (на увеличение кинетической энергии низкоскоростной струи и диссипацию механической энергии)

$$\frac{L_{rsm}}{L_{rsm} + L^*}.$$

Представленные результаты показывают минимум потерь механической энергии в виде тепла при равенстве скоростей смешивающихся потоков, что соответствует физическим представлениям о процессе смешения.

Доля потерь механической энергии в виде тепла составляет менее 50% от потерь механической энергии более высокоскоростной струи. Причем доля потерь механической энергии в виде тепла возрастает при увеличении разницы скоростей смешивающихся потоков и стремится к нулю при $\frac{c_{II}}{c_I} = 1$.

На рис. 7 - 10 представлены аналогичные зависимости при смешении потоков с разными температурами ($T_I = 850K$, $T_{II} = 350K$, $m = 5,9$)

Отмечаются те же закономерности, что и при смешении изотермических струй. Очевидно, что при разных температурах струй условию $\frac{c_{II}}{c_I} = 1$ соответ-

ствует неравенство $\frac{\lambda_{II}}{\lambda_I} \neq 1$, что отображено на рис.7.

Кроме того, необходимо отметить, что для обоих случаев смешения доля потерь механической энергии в виде тепла составляет менее 0,5% от начальной энергии более высокоскоростной струи.

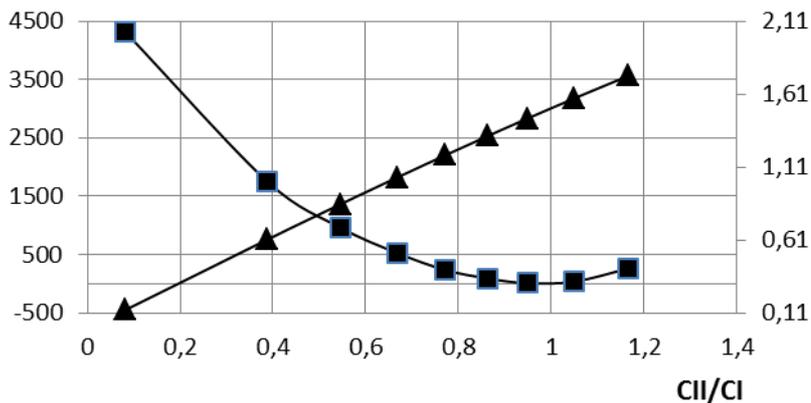


Рис. 7. Влияние соотношения скоростей потоков на L_{rcm}

—■— L_{rcm} ; —▲— $\frac{\lambda_{II}}{\lambda_I}$

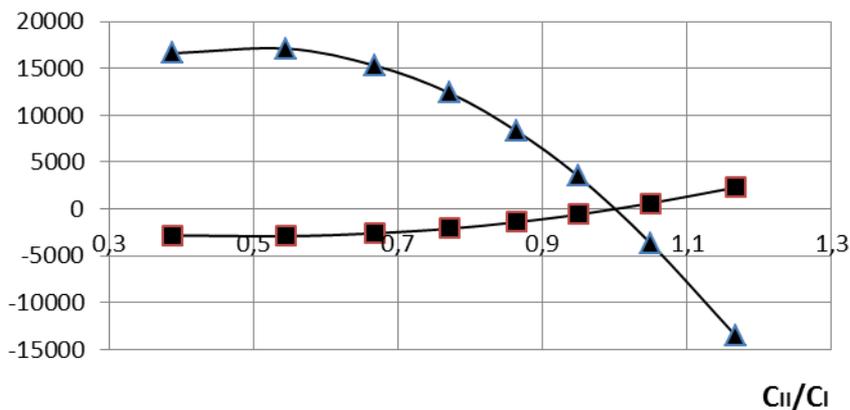


Рис. 8. Влияние соотношения скоростей потоков на L_I^*, L_{II}^*

—▲— L_I^* ; —■— L_{II}^*

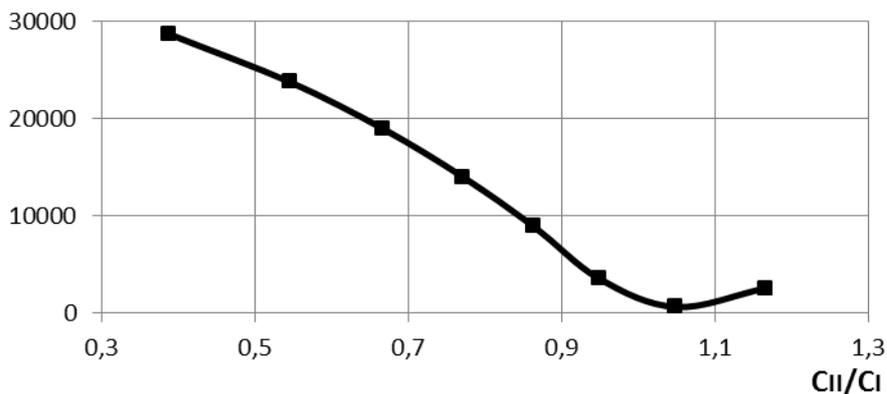


Рис. 9. Влияние соотношения скоростей потоков на $(L_{rcm} + L^*)$ - потери механической энергии высокоскоростной струи (увеличение кинетической энергии низкоскоростной струи и работа трения, переходящая в тепло)

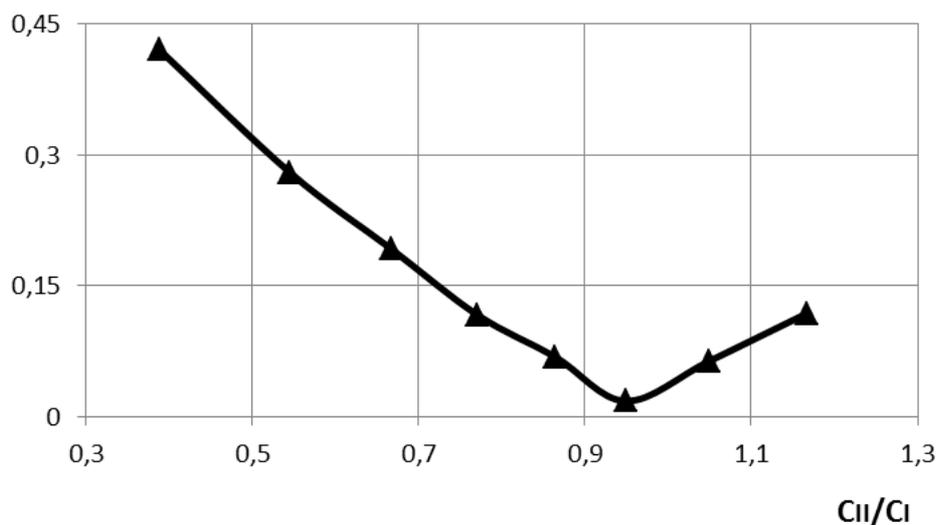


Рис. 10. Отношение диссипации механической энергии к потерям механической энергии высокоскоростной струи $\frac{L_{rcm}}{L_{rcm} + L^*}$

Заключение

В работе на основе обобщенного уравнения Бернулли и гипотезы о полнотности процессов в смешивающихся струях:

1) получены формулы для потерь механической энергии в виде тепла, а также формулы для расчета работы, передаваемой от высокоскоростной струи к низкоскоростной;

2) оценена величина потерь механической энергии в виде тепла, и соотношение потерь механической энергии в виде тепла и потерь механической энергии высокоскоростной струи;

3) показано, что полученные результаты согласуются с физическими представлениями о процессе смешения потоков.

Список литературы

1. Теория двухконтурных турбореактивных двигателей [Текст] / В. П. Деменченков, Л. Н. Дружинин, А. Л. Пархомов и др.; под ред. С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова. – М. : Машиностроение, 1979. – 700 с.
2. Нечаев, Ю. Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: в 2 ч. Ч. 2 / Ю. Н. Нечаев, Р. М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1978. – 336 с.

Поступила в редакцию 17.03.2016

Визначення втрат механічної енергії при змішуванні потоків в ТРДД

У цій статті за допомогою узагальненого рівняння Бернуллі і гіпотези про політропність процесів в струменях, що змішуються, отримана формула для визначення втрат механічної енергії потоку, що переходять в теплоту. Це дозволило визначити величину роботи, здійснювану високошвидкісним струменем, по збільшенню кінетичної енергії низько швидкісного струменя. Виконані розрахунки змішення ізотермічних і неізотермічних дозвукових струменів в циліндричній камері змішення за умови відсутності тертя на її стінках при різних співвідношеннях швидкостей потоків, що змішуються. Показана відповідність отриманих результатів фізичним уявленням про процес змішення. Виконане порівняння втрат механічної енергії у вигляді тепла і роботи, високошвидкісним струменем, що витрачається, на збільшення кінетичної енергії низько швидкісного струменя, на різних режимах роботи камери змішення.

Ключові слова: втрати механічної енергії, ТРДД, процес змішування.

Determination of Mechanical Energy Losses when Mixing Flows in Turbofan

In this paper, using the generalized Bernoulli equation and hypothesis of polytropic process in the mixing jets, a formula for determining of the mechanical energy losses of the flow, passing to the heat, is obtained. It is possible to determine the magnitude and the work done by a high-speed jet to increase the kinetic energy of a low-speed jet. The calculations of isothermal and non-isothermal mixing subsonic jets in a cylindrical mixing chamber in the absence of friction on its walls at different speed ratios of mixing streams are performed. The correspondence of the results of the physical representations of the mixing process is obtained. The comparison of the mechanical energy losses in the form of heat and work expended by high-speed jet to increase the kinetic energy of low-speed jet is performed for different operating modes of the mixing chamber.

Key words: mechanical energy losses, turbofan engine, mixing process.