

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ (SHORT REPORTS)

ISSN 2519-8742. Механика. Исследования и инновации. Вып. 14. Гомель, 2021

---

УДК 532.517:621.454.2

*А. А. ЗУЕВ, Л. П. НАЗАРОВА, Е. В. ФАЛЬКОВА, Н. А. ДАНИЛОВ*  
*Сибирский государственный университет науки и технологий*  
*им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НА ДИСКОВОЕ ТРЕНИЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

Приведены результаты исследования потерь в высокоскоростных центробежных насосах турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей, обусловленных дисковым трением. Показано влияние степени турбулизации динамического пространственного пограничного слоя на профиль скорости в нем. Получены аналитические выражения напряжений трения, момента сопротивления и мощности сил дискового трения.

**Ключевые слова:** дисковое трение, потери энергии, турбонасосный агрегат, жидкостный ракетный двигатель, мощность.

Роторы современных центробежных насосов турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) вращаются с весьма большими угловыми скоростями, соответствующими 120000 об./мин и более [1]. В связи с этим необходимо развитие теории расчетов течения жидкости в пограничном слое. В настоящее время для решения таких задач применяют как численное моделирование элементов проточной части, так и эмпирические зависимости, включающие опытно полученные коэффициенты [2–5]. Создание новых теоретических методик анализа процессов, происходящих в ТНА, позволяет существенно сократить сроки проектно-конструкторских работ и связанные с ними затраты.

Рассматриваемая двигательная установка и отдельные ее узлы должны при всех режимах работы обеспечивать подачу компонентов топлива с требуемым расходом и давлением при высокой степени надежности и КПД; обеспечивать минимальные размеры и массу; обладать простотой конструк-

ции и минимальной стоимостью. В связи с этим требуется анализ потерь мощности на дисковое трение, которые при больших частотах вращения ротора могут составлять значительную долю от суммарных потерь.

Особенности расчета и проектирования ТНА ЖРД связаны с необходимостью учета высоких скоростей турбулентных потоков, возможности нахождения рабочих тел в газообразном и жидком состояниях, экстремально высоких значений тепловых потоков, температур и давлений [6, 7]. Многочисленные исследования, проведенные различными авторами, демонстрируют значительный разброс результатов, которые существенно зависят от различных факторов [8–11].

Авторами принято, что при турбулентном течении в пограничном слое для практически важных случаев реализуется степенной закон распределения профиля скорости [13–15]. Показатель степени турбулизации  $m$  профиля скорости принимался при расчетах в диапазоне от 6 до 12.

В результате анализа течения потока рабочего тела в канале между вращающимся диском и неподвижной стенкой получены формулы для касательных напряжений трения на поверхностях обоих названных тел, а также соответствующие выражения коэффициентов трения, которые хорошо согласуются с зависимостями, полученными иными авторами [9], и имеют более широкий доверительный интервал использования по сравнению с ними.

Выработаны рекомендации по определению показателя степени турбулизации профиля скорости в зависимости от критерия Рейнольдса вращательного течения (частоты вращения ротора). В соответствии с ними целесообразно на диске принимать  $m = 9 \dots 11$ , а на стенке –  $7 \dots 9$ .

Также в результате интегрирования получены аналитические выражения момента сопротивления и мощности сил дискового трения, которые могут быть использованы при определении технических характеристик проектируемых центробежных насосов.

Полученные в ходе исследования аналитические выражения для определения коэффициентов, определяющих потери на дисковое трение, позволяют более корректно осуществлять расчет мощности ТНА ЖРД. Использование различных показателей степени  $m$  турбулентного динамического пространственного пограничного слоя существенно расширяет диапазон области достоверного определения параметров дискового трения по сравнению с эмпирическими зависимостями, полученными иными авторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Дисковое трение при определении баланса мощностей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / А. А. Зуев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 57. – С. 17–31.

2 Effect of impeller blades number on the performance of a centrifugal pump / G. R. H. Abo Elyamin [et al.] // Alexandria Engineering Journal. – 2019. – Vol. 58, is. 1. – P. 39–48.

3 The influence of blade outlet angle on the performance of centrifugal pump with high specific speed / H. Ding [et al.] // *Vacuum*. – 2019. – Vol. 159. – P. 239–246.

4 On the flow field and performance of a centrifugal pump under operational and geometrical uncertainties / S. Salehi [et al.] // *Applied Mathematical Modelling*. – Vol. 61. – P. 540–560.

5 **Mansour, M.** Effect of tip clearance gap and inducer on the transport of two-phase air-water flows by centrifugal pumps / M. Mansour, B. Wunderlich, D. Thevenin // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2018. – Vol. 99. – P. 487–509.

6 **Leto, A.** Preliminary design method of a turbopump feed system for liquid rocket engine expander cycle / A. Leto, R. Votta, A. Bonfiglioli // *Energy Procedia*. – 2016. – Vol. 101. – P. 614–621.

7 Key technology for reusable rocket engine turbopump / A. Okayasu [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2002. – Vol. 50, is. 6. – P. 351–355.

8 **Karman, Th. V.** Über laminare und turbulente Reibung / Th. V. Karman // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. – 1921. – Bd. 1, H. 4. – S. 233–252.

9 **Дорфман, Л. А.** Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел / Л. А. Дорфман. – М. : Физматгиз, 1960. – 260 с.

10 **Jacques, R.** Axisymmetric numerical simulations of turbulent flow in rotor stator enclosures / R. Jacques, P. Le Quere, O. Daube // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2002. – Vol. 23, no. 4. – P. 381–397.

11 **Owen, J. M.** Heat transfer from an air cooled rotating disk / J. M. Owen, C. M. Haynes, F. J. Bayley // *Proceedings of the Royal Society of London. A*. – 1974. – Vol. 336, is. 1607. – P. 453–473.

12 **Schulz-Grunow, F.** Der Reibungswiderstand rotierender Scheiben in Gehäusen / F. Schulz-Grunow // *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. – 1935. – Bd. 15, H. 4. – S. 191–204.

13 **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с.

14 Комплексный метод в теории теплоотдачи для полостей вращения насосов с кольцевой линией тока / Е. В. Фалькова [и др.] // *Механика. Исследования и инновации*. – 2020. – Вып. 13. – С. 209–212.

15 Disc friction to specify power balance of a turbopump unit of LPE / A. A. Zuev [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 822. – Paper 012023. – 5 p.

*A. A. ZUEV, L. P. NAZAROVA, E. V. FALKOVA, N. A. DANILOV*

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

## **DETERMINATION OF DISK FRICTION LOSSES AT CALCULATIONS OF TURBO-PUMP AGGREGATES**

The results of losses investigation in high-speed centrifugal pumps of turbopump aggregates of liquid-propellant rocket engines due to disk friction are presented. The influence of the turbulence value of the dynamic spatial boundary layer on the velocity profile in it is shown. Analytical expressions for friction stresses, moment of resistance and power of disk friction forces are obtained.

**Keywords:** disk friction, energy losses, turbopump aggregate, liquid rocket engine, power.

Получено 09.11.2021