

УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)

Е. В. ДОРОШЕНКО

*Национальный авиационный университет, Киев*

## **ВЛИЯНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЛОПАТОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА СТУПЕНИ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА**

*Представлены результаты расчетных исследований влияния абразивного износа лопаток лопаточного венца ступени осевого компрессора на уровень потерь, обусловленных вязким трением. Полученные данные могут быть использованы для оценки влияния абразивного износа на изменение коэффициента полезного действия ступеней осевого компрессора.*

**Ключевые слова:** абразивный износ, шероховатость, решетка профилей, моделирование течения, коэффициент полезного действия, пограничный слой.

**Вступ.** Абразивный износ лопаток – один из основных факторов, который влияет на искажение геометрической формы и ухудшение состояния поверхности лопаток в условиях эксплуатации. Абразивный износ на пере лопаток, кроме песка, соли и пыли, могут вызывать частицы, которые образуются в процессе горения различных тяжелых нефтяных и синтетических топлив.

Проблема эрозии лопаток компрессора является одной из актуальных проблем в области газотурбостроения. В результате воздействия на лопаточные венцы компрессоров ГТД твердых и жидких частиц, находящихся в воздухе (пыль, дождь), происходят механические повреждения поверхности лопаток, что приводит к ухудшению их прочностных и аэродинамических характеристик.

Для более детального изучения картины обтекания при наличии шероховатости на поверхности лопаток целесообразно использовать численное моделирование.

**Постановка задания.** Исследованию абразивного износа лопаток посвящено много работ. В работе [1] представлены сведения о различных эрозионно-стойких покрытиях. В работе [2] представлены обобщенные результаты исследований влияния песочной шероховатости в трубах, на пластине, в диффузорных каналах. В работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований влияния размещения шероховатости на аэродинамические характеристики компрессорных решеток. В работе [4] рассмотрены разные виды генераторов вихрей на поверхности профиля. В работе [5] рассмотрено влияние сжимаемости потока на величину допустимой высоты шероховатости. В работе [6] рассмотрено влияние шероховатости на аэродинамические характеристики турбинной решетки, показано, что при увеличении числа Рейнольдса коэффициент потерь полного давления значительно возрастает.

В данной работе ставится задача исследования влияния высоты шероховатости на изменение коэффициента полезного действия (КПД) решетки аэродинамических профилей на оптимальном режиме обтекания. В качестве решетки аэродинамических профилей в данной работе рассматривается элементарный лопаточный венец, что позволяет не учитывать изменение параметров потока в радиальном направлении (по оси  $z$ ).

**Моделирование течения в элементарном лопаточном венце ступени осевого компрессора абразивным износом лопаток.** В общем случае шероховатость стенки способствует переходу ламинарной формы течения в турбулент-

ную, то есть при прочих равных условиях переход на шероховатой стенке наступает при меньшем числе Рейнольдса, чем на гладкой стенке. Шероховатость вызывает в ламинарном течении дополнительные возмущения, которые присоединяются к возмущениям, уже имеющимся вследствие какой-то степени турбулентности внешнего течения. Суммарные, в целом более сильные возмущения требуют меньшего нарастания, чтобы привести к переходу ламинарного течения в турбулентное.

Допустимой высотой шероховатости называется та предельная высота элементов шероховатости, которая при обтекании стенки еще не вызывает увеличения сопротивления по сравнению с сопротивлением гладкой стенки. Понятие допустимой высоты шероховатости весьма важно с практической точки зрения, так как оно дает возможность заранее судить, к какой степени гладкости необходимо стремиться при технической обработке поверхности с целью уменьшения сопротивления. С физической точки зрения обстоятельства, определяющие допустимую высоту шероховатости, существенно различны для ламинарного и турбулентного пограничного слоя.

При турбулентном пограничном слое шероховатость не влечет за собой увеличения сопротивления при условии режима без проявления шероховатости, то есть при условии что ни один из элементов шероховатости не выступает за пределы ламинарного подслоя, толщина которого составляет очень небольшую долю турбулентного пограничного слоя.

Согласно [2] это условие записывается в виде:

$$\frac{wk_{\text{доп}}}{\nu} = 100,$$

где  $w$  – скорость набегающего потока,  $k_{\text{доп}}$  – допустимая высота шероховатости,  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха.

После преобразований, получаем неравенство для допустимой высоты шероховатости

$$k_{\text{доп}} \leq 100 \frac{\nu}{w}.$$

Это выражение можно записать в следующем виде:

$$k_{\text{доп}} \leq b \frac{100}{\text{Re}},$$

где число Рейнольдса  $\text{Re} = \frac{wb}{\nu}$ ,  $b$  – хорда профиля.

В данной работе объектом исследования является решетка аэродинамических профилей, имеющая следующие геометрические параметры: хорда профиля  $b=50\text{мм}$ , шаг решетки  $t=50\text{мм}$ , угол установки профилей  $\gamma=64^\circ$ .

Для данной решетки теоретическое значение допустимой высоты шероховатости при числе Маха на входе в решетку  $M_w=0,43$  определяется как  $k_{\text{доп}} \leq 0,01\text{мм}$ , то есть шероховатость выше  $0,01\text{мм}$  будут создавать дополнительное сопротивление и изменять характер обтекания решетки.

Первым этапом расчета в данной работе было моделирование течения на гладкой решетке аэродинамических профилей. Для моделирования течения использовались уравнения Навье-Стокса, которые замыкались моделью турбулентной вязкости SST Ментера [7]. При использовании данной модели турбу-

лентности точность решения достаточно высокая для данного класса задач [8] наиболее точно. Для расчета использовалась мелкая нерегулярная адаптивная расчетная сетка. На рис. 1 представлено мгновенное векторное поле скоростей при числе Маха на входе  $M_w=0,43$  при оптимальном угле атаки.

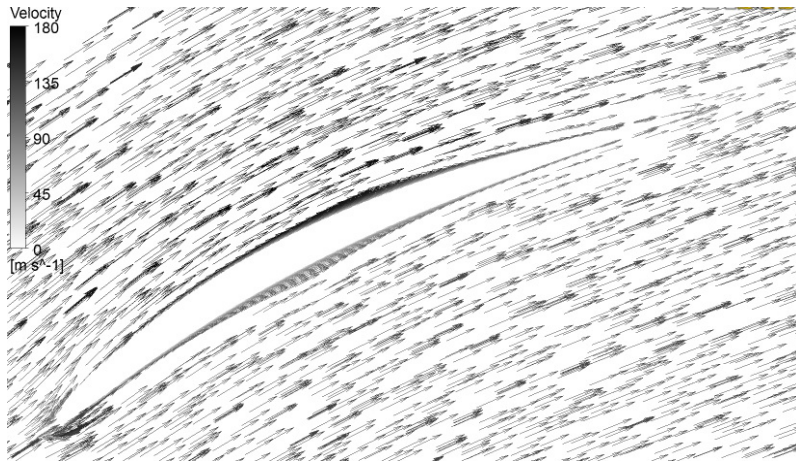


Рис. 1. Мгновенное векторное поле скоростей в решетке гладких лопаток

Второй этап работы состоял в моделировании течения в решетке аэродинамических профилей с абразивным износом. Как было определено ранее, высота шероховатости должна быть больше 0,01 мм. В работе исследовалось течение в решетках аэродинамических профилей с высотой искусственной шероховатости 0,1 мм (относительная высота 0,002), 0,25 (относительная высота 0,005) мм и 0,5 мм (относительная высота 0,01). Элементы искусственной шероховатости размещались на спинке профиля, на промежутке с 10% до 70% хорды, с шагом 5% хорды. Форма элементов искусственной шероховатости – полусфера.

На рис. 2–4 представлено мгновенное векторное поле скоростей при числе Маха на входе  $M_w=0,43$  при оптимальном угле атаки для решеток с абразивным износом.

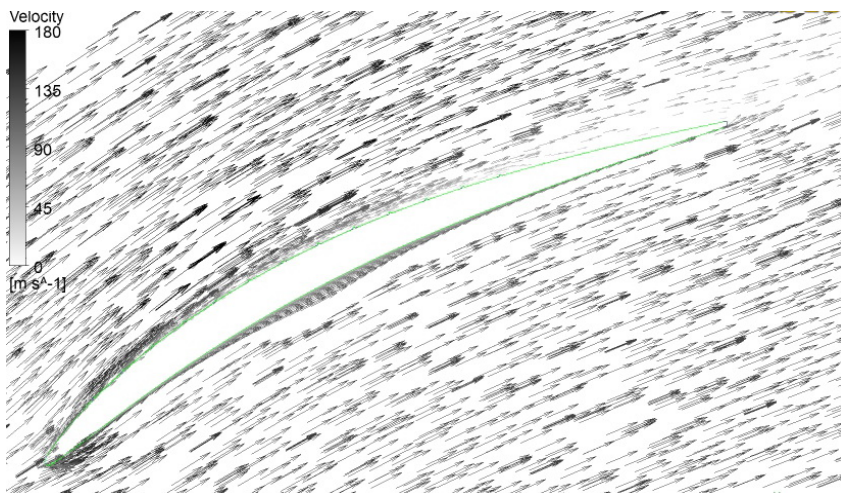


Рис.2. Мгновенное векторное поле скоростей в решетке лопаток с высотой искусственной шероховатости 0,1 мм

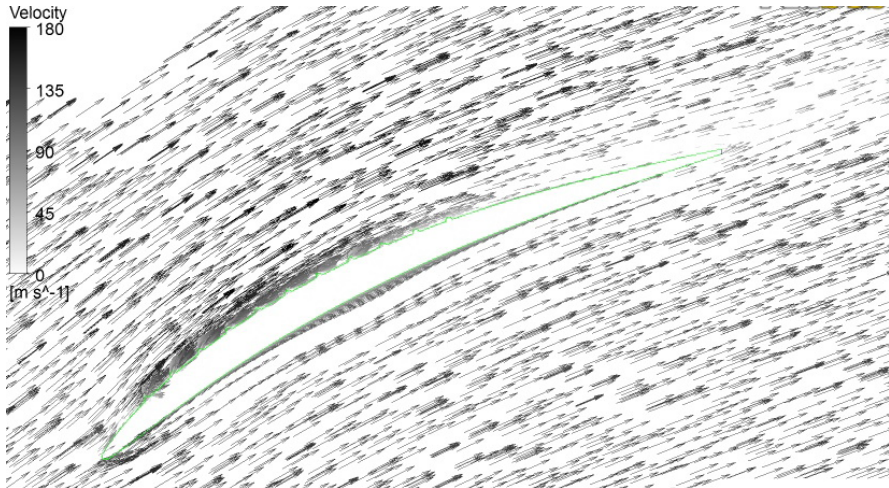


Рис.3. Мгновенное векторное поле скоростей в решетке лопаток с высотой искусственной шероховатости 0,25 мм

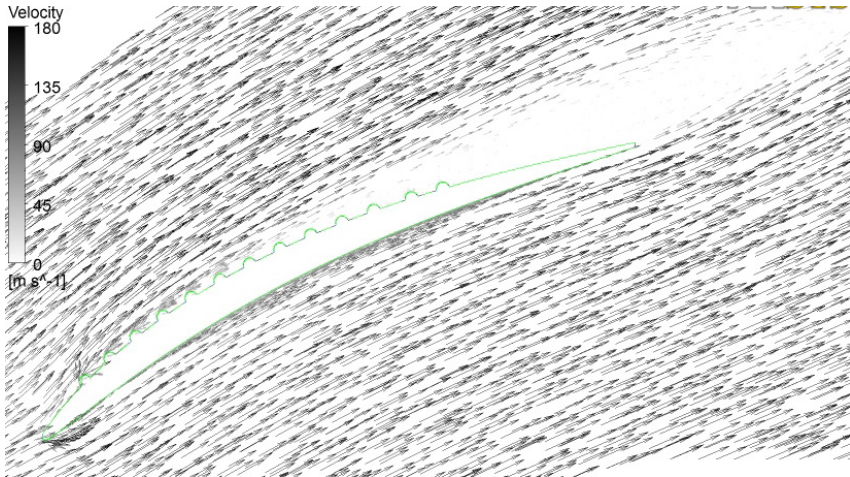


Рис.4. Мгновенное векторное поле скоростей в решетке лопаток с высотой искусственной шероховатости 0,5 мм

Анализируя картину обтекания гладкой решетки и решеток с искусственной шероховатостью, можно сделать вывод, что абразивный износ создает дополнительное сопротивление, что проявляется в повышении уровня турбулентности и возникновении вихревого обтекания. Видно, что при высоте шероховатости 0,1 и 0,25 мм создается только один небольшой вихрь, в тоже время при тех же условиях обтекания, но при высоте шероховатости 0,5 мм вихревое обтекание намного интенсивнее.

Это можно объяснить тем, что шероховатость высотой 0,1 и 0,25 мм создает перемешивание турбулентного слоя, тем самым затягивая его отрыв. В тоже время, шероховатость высотой 0,5 мм создает слишком большое дополнительное сопротивление, при этом увеличивая интенсивность турбулентного течения.

По результатам численного моделирования был рассчитан коэффициент полезного действия каждой решетки (рис.5). Коэффициент полезного действия рассчитывался по формуле:

$$\eta=1-\xi,$$

где  $\xi = \frac{p_1^* - p_2^*}{\frac{\rho_1 w_m^2}{2}}$  - коэффициент потерь полного давления,  $p_1^*, p_2^*$  - давление заторможенного потока на входе и выходе из решетки,  $\rho_1$  - плотность воздуха на входе в решетку,  $w_m$  - средняя относительная скорость воздуха.

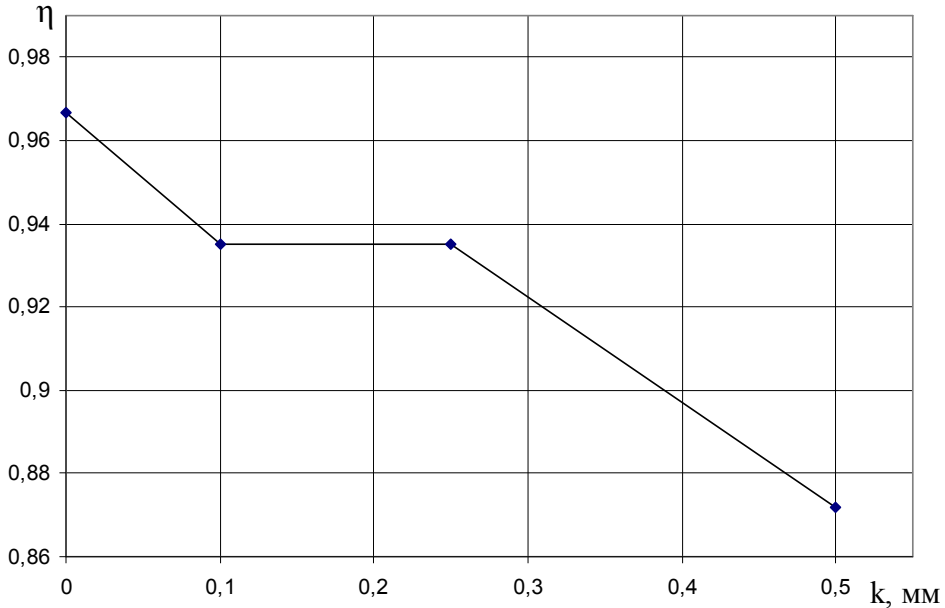


Рис. 5. Зависимость КПД лопаточного венца от высоты элементов искусственной шероховатости

Результаты численного моделирования течения в решетке аэродинамических профилей показали, что при отсутствии абразивного износа КПД равен 97%, при высоте шероховатости 0,1–0,25 мм коэффициент полезного действия уменьшается на 3 %, при увеличении высоты шероховатости вдвое (0,5 мм) КПД уменьшается на 8%.

**Выводы.** Результаты исследования влияния высоты шероховатости на изменение коэффициента полезного действия решетки аэродинамических профилей на оптимальном режиме обтекания показали, что абразивный износ лопаток приводит к уменьшению коэффициента полезного действия. При относительной высоте регулярной шероховатости 0,002–0,005 коэффициент полезного действия уменьшается на 3 %. Дальнейшее увеличение высоты шероховатости до 0,01 приводит к снижению КПД лопаточного венца на 7...8% в сравнении с КПД лопаточного венца, состоящего из гладких лопаток.

#### Список литературы

1. Богуслаев В. А. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1. Монография. / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
3. Терещенко, Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
4. Чжен, П. Управление отрывом потока / П. Чжен. – М: Мир, 1979. – 552с.



5. Репик Е.У. Турбулентный пограничный слой. Методика и результаты эксперимента / Е.У. Репик, Ю.П. Соседко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312с.
6. Bai T. Effect of surface roughness on the aerodynamic performance of turbine blade cascade / T. Bai, Liu J., Zhang W., Zou Zhengping // Propulsion and Power Research. – 2014. – Vol. 3, Issue 2. – P. 82–89.
7. Menter, F. R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications / F. R. Menter // AIAA J.– 1994. – Vol. 32, Issue 8. – P. 1598–1605. doi:10.2514/3.12149.
8. Бойко, А. В. Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин / А. В. Бойко, Ю. Н. Говорущенко, М. В. Бурлака. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – 192с.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2016

*К. В. ДОРОШЕНКО*

### **ВПЛИВ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ ЛОПАТОК НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛОПАТКОВОГО ВІНЦЯ СТУПЕНЯ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА**

Представлено результати розрахункових досліджень впливу абразивного зношування лопаток лопаткового вінця ступеня осьового компресора на рівень втрат, обумовлених в'язким тертям. Отримані дані можуть бути використані для оцінювання впливу абразивного зношування на зміну коефіцієнта корисної дії ступенів осьового компресора.

**Ключові слова:** абразивне зношування, шорсткість, решітка профілів, моделювання течії, коефіцієнт корисної дії, пограничний шар.

*К. V. DOROSHENKO*

### **ABRASIVE WEAR IMPROVING OF BLADES ON EFFICIENCY OF BLADE ROW OF AXIAL-FLOW COMPRESSOR STAGE**

In work the results of numerical modeling of abrasive wear improving of axial-flow compressor blades on the losses due to viscous friction are presented. Abrasive wear reduces efficiency. When the regular roughness has relative height 0.002-0.005 efficiency is decreased by 3%, with a further increasing the roughness relative height to 0.01 efficiency is decreased by 8% as compared with the efficiency of smooth axial-flow compressor blades.

**Key words:** abrasive wear, roughness, airfoil cascade, flow modeling, efficiency, boundary layer.

**Дорошенко Екатерина Викторовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры авиационных двигателей Национального авиационного университета, kiki\_ua@ukr.net.