

УДК 621.515

Н.М. Зубов,

В.Г. Прокопович

К РАСЧЕТУ ДВУХМЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
НА СТЕНКЕ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

При анализе экспериментальных данных и оценки потерь в периферийной области изолированного рабочего колеса осевого компрессора предлагается использовать простое приближение двухмерного пограничного слоя в отличие от концепции трехмерного пограничного слоя и концепции Меллора и Вуда об эквивалентных "осесимметричных" течениях /1-2/. Как показывает опыт /3/, такое приближение может оказаться плодотворным.

Рассматривается двухмерный турбулентный пограничный слой на торцевой стенке осевого компрессора. Система обыкновенных дифференциальных уравнений пограничного слоя /4/, состоит из уравнений импульса и механической энергии. В качестве дополнительных соотношений используются формулы Людвига и Тиллмана для напряжения трения; Труккенбротта для диссипации энергии и Вигхардта для связи между формпараметрами /5/.

Поскольку расчет характеристик пограничного слоя выполняется в абсолютной системе координат, то важным вопросом становится способ вычисления скорости на внешней границе слоя на каждом шаге интегрирования системы уравнений. Исходным для расчета скорости является распределение давления вдоль стенки, полученное из опыта.

Расчетная область включает в себя участок стенки перед рабочим колесом, зону над рабочим колесом и небольшой участок после рабочего колеса.

Делается допущение о равенстве давлений на стенке и на внешней границе пограничного слоя. Известно /1/, что в области рабочего колеса это допущение не соответствует опытным данным. Меллор и Вуд /2/ устранили это несоответствие введением в уравнение количества движения дополнительной величины некоторой "эффективной" силы на лопатке. Здесь делается попытка добиться того же с помощью учета подвода механической энергии, равной адиабатической работе рабочего колеса. С этой целью для вычисления скорости используется обобщенное уравнение Бернулли, составленное для компрессора /6/:

$$L_k = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{U_2^2 - U_1^2}{2} + L_{zk}.$$

Здесь: L_k - подведенная работа, p - давление, ρ - плотность, U - скорость, L_{zk} - потери на трение.

При вычислении на каждом шаге интегрирования уравнение Бернулли приобретает вид

$$(L_k - L_{zk})_n = \frac{P_n - P_{n-1}}{\rho} + \frac{U_n^2 - U_{n-1}^2}{2},$$

откуда величина скорости

$$U_n = \sqrt{2[(L_k - L_{zk})_n - (P_n - P_{n-1})/\rho] + U_{n-1}^2}.$$

Здесь $(L_k - L_{zk})_n$ - некоторая величина адиабатической работы рабочего колеса на участке, равном шагу интегрирования.

Распределение адиабатической работы вдоль осевой протяженности торца лопатки выбирается следующим образом. Предполагается, что величина адиабатической работы на участке, равном шагу интегрирования, пропорциональна результирующей силе, действующей на лопатку на этом участке в ее периферийном сечении. Анализ распределения давления на профиле в периферийных сечениях лопаток /7-8/ дает основание в первом приближении при-

нять распределение работы вдоль меридиональной проекции хорды в форме трапеции. В этом случае выделяются три участка: на среднем участке $0,1 \leq \bar{l} \leq 0,7$ (\bar{l} - относительная осевая протяженность торца лопатки) адиабатическая работа в расчете на один шаг интегрирования постоянна, на первом и третьем участках работа изменяется по линейному закону.

В расчетах адиабатическая работа принимается равной работе рабочего колеса. Кроме того, вводится поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность распределения работы по высоте лопатки. При этих условиях вычисленная величина скорости за рабочим колесом неплохо соответствует величине скорости в периферийной области, полученной из опыта.

Начальные условия для расчета пограничного слоя получены при обработке опытных профилей скорости у стенки перед рабочим колесом.

В соответствии с предложенным алгоритмом составлена программа расчета двумерного турбулентного пограничного слоя на языке Фортран 77. На рисунке представлены результаты расчетов характеристик пограничного слоя на стенке осевой ступени С-12 на двух режимах по расходу ($\bar{c}_a = 0,317$ и $0,435$).

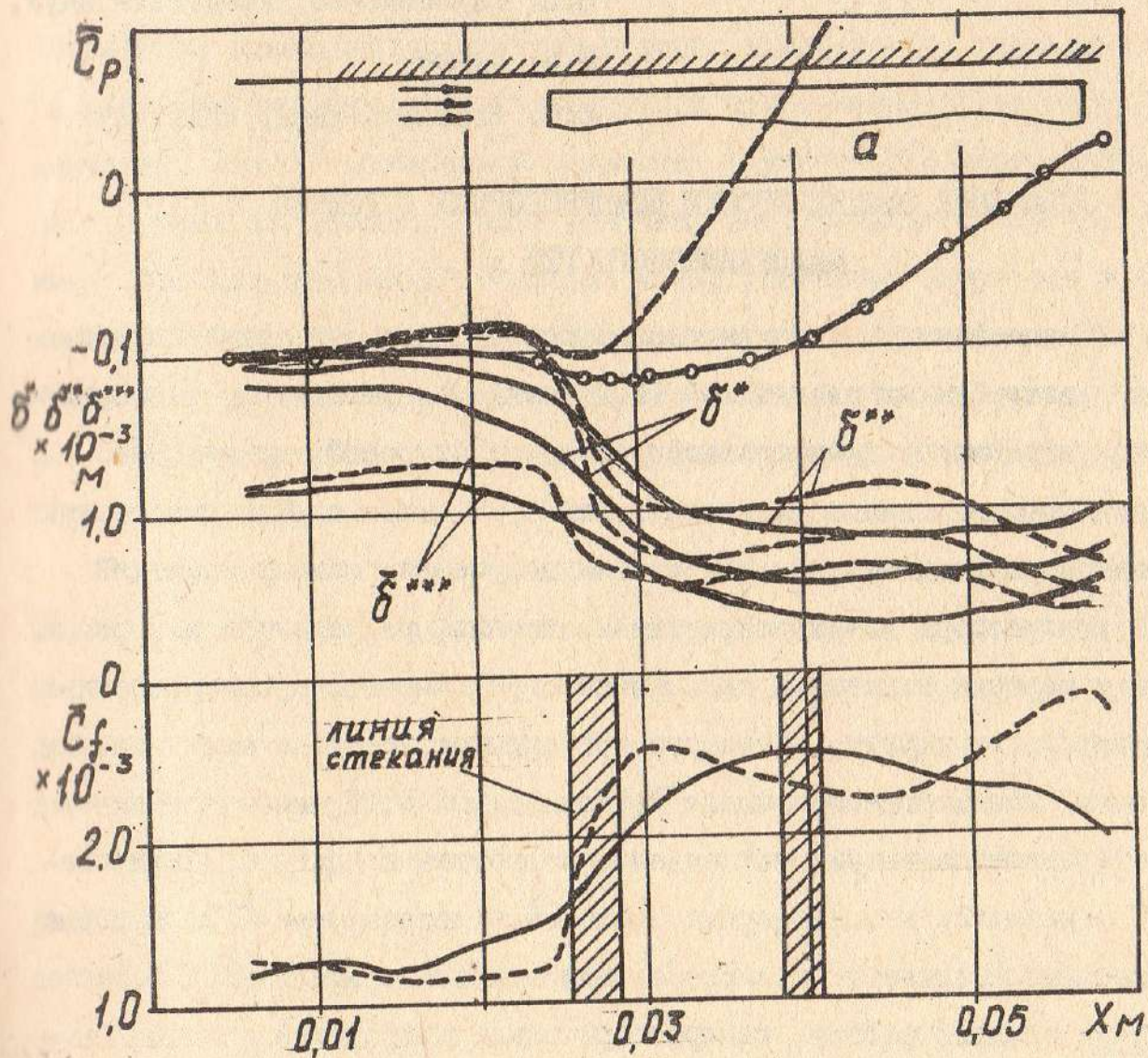
Сравнение рассчитанных характеристик пограничного слоя в сечении за рабочим колесом с характеристиками, вычисленными по опытным профилям продольной скорости, показывает, что расхождение рассчитанных условных толщин δ^* , δ^{**} , δ^{***} с опытом составляет 90% ($\bar{c}_a = 0,317$) и 125% ($\bar{c}_a = 0,435$), коэффициента трения C_f соответственно 53% и 25%. Расхождение может считаться вполне приемлемым на данном предварительном этапе исследования.

Обращает на себя внимание, что принятый приближенный метод расчета отслеживает наличие на стенке над рабочим колесом области стекания (на рисунке заштрихованные полосы), обнаруженной в эксперименте /9/: этой области соответствует характерный пик в распределении коэффициента трения C_f .

Предложенный подход для расчета характеристик турбулентного пограничного слоя на стенке осевого компрессора требует уточнения, но уже сейчас видно, что он может выявлять характерные тенденции течения в периферийной области рабочего колеса и послужить в дальнейшем одним из элементов в разрабатываемой модели течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турбулентность/Под ред. П. Брэдшоу. - М.: Машиностроение, 1980. - 343 с.
2. Меллор, Вуд. Теория пограничного слоя на торцевой стенке осевого компрессора. Теоретические основы инженерных расчетов, 1971, № 2, С. 192-208.
3. Зубов Н.М., Редин И.И. Оценка границы отрыва потока от стенки корпуса с надроторным устройством. Газовая динамика двигателей и их элементов. Харьков, ХАИ, 1987. С. 16-20.
4. *Eppeler R. Practische Berechnung laminarer und turbulenter absauge-grenzschichten // Ingenieur-Archiv, 32, 1963, № 4, 221-245.*
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. - 711 с.
6. Нецаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей, ч. I. М.: Машиностроение, 1977, - 312 с.
7. Лакшминараяна В., Пуарар М., Давино Р. Трехмерное поле течения в периферийной области рабочего колеса компрессора. Ч. I. Энергетические машины и установки, 1982. Т. 104, № 4, С. 43-65.
8. Дринг, Джослик, Хардин. Экспериментальное исследование течения в рабочем колесе осевого компрессора. Энергетические машины и установки, 1982. № I, С. 57-71.
9. Незым В.Ю., Поздняков В.А., Прокопович В.Г., Угрюмов М.Л. Экспериментальные исследования течения в области радиального зазора осевого компрессора. Энергетическое машиностроение, 1990, № 49. С. 22-28.



Распределение параметров пограничного слоя вдоль стенки осевого компрессора: — — — — $\bar{C}_a = 0,435$; — — — — $\bar{C}_a = 0,317$; а — меридиональная проекция лопатки