

УДК 621.165

**А.В. БОЙКО**, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**М.В. БУРЛАКА**, м.н.с. НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**Д.И. МАКСЮТА**, инженер НТУ «ХПИ», г. Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ CFD РАСЧЕТА ТУРБИНОЙ РЕШЕТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ АТАКИ**

У роботі проведено дослідження впливу коефіцієнтів моделі турбулентності на результати CFD розрахунку турбінної решітки при різних кутах атаки. Наведено залежності коефіцієнта перемежовуваності і коефіцієнта BetaStar від кута набігання потоку в турбінну решітку 1ММК. Вироблена методика уточнення коефіцієнтів моделі турбулентності з допомогою методу планування чисельного експерименту.

The influence of the turbulence model on the results of CFD calculation of turbine grid at different angles of attack was analyzed. The plots of dependence of the intermittency and BetaStar coefficient on the angle of inflow in turbine grid 1MМК are built. A method which specifies coefficients of the model of turbulence using the numerical experiment planning is developed.

### **Введение**

В настоящее время, в связи с достаточно высоким уровнем развития методов вычислительной гидродинамики (CFD), можно существенно уменьшить количество экспериментальных исследований, если использовать CFD расчеты для совершенствования элементов турбомашин. При этом физический эксперимент проводят только на завершающем этапе, перед внедрением новшества.

Как отмечалось в [1] работы по оптимальному проектированию проточной части осевых турбин в настоящее время широко развиваются. Оптимизация проточных частей турбомашин является приоритетным направлением научно-исследовательских разработок ведущих зарубежных фирм и университетов. Без использования аппарата оптимизации невозможно говорить о прогрессе в области создания высокоэффективных проточных частей турбомашин, конкурентных на мировом рынке.

Одним из направлений оптимизации турбомашин является создание турбин ориентированных на многорежимное использование. При этом углы натекания на рабочие решетки могут сильно отличаться от номинальных. Современный уровень развития методов вычислительной гидродинамики позволяет создавать высокоэффективные профили лопаток для номинальных режимов [2]. Однако, расчетные зависимости коэффициентов потерь энергии от угла натекания потока на решетку имеют значительные различия с экспериментальными данными в области ненулевых углов атаки. Одной из возможных причин этого является то, что пограничный слой в моделях турбулентности по умолчанию рассматривается как турбулентный по всей своей протяженности, в то время как в действительности имеет место смешанный пограничный слой, характеризующийся несколько меньшими потерями энергии [3].

В связи с вышесказанным, актуальным является задача исследования влияния коэффициентов модели турбулентности на результаты CFD расчета турбинной решетки, особенно при ненулевых углах атаки, решению которой и посвящена данная работа.

### Постановка задачи

Объект исследования – решетка с профилями активного типа 1ММК с параметрами:  $t/b = 0,722$ ,  $\beta_y = 13,567^\circ$ ,  $b = 28,88$  мм,  $\beta_{1r} = 29,5^\circ$ . Граничные условия:  $P_1^* = 1,194219$  атм,  $T_1^* = 20$  °С,  $P_2 = 1$  атм, рабочее тело – воздух. Указанным граничным условиям соответствует дозвуковое истечение с  $M_{2r} = 0,51$ , и  $Re = 4,3 \cdot 10^5$ . Экспериментальные данные по продувке соответствующей плоской решетки при различных углах входа потока представлены в работе [4]. Плоскость замера параметров в расчетах, как и в эксперименте, располагалась на расстоянии 10,35 мм от выходных кромок.

Для получения данных о вязком течении в турбинной решетке численно решалась система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Расчетная схема TVD второго порядка аппроксимации с локально первым в местах высоких градиентов. Все расчеты проводились в двумерной постановке. Расчетная сетка размерностью 600×300 элементов. Модель турбулентности – SST.

Цель исследования – уточнить CFD расчет вязкого течения в турбинной решетке активного типа при ненулевых углах атаки, путем определения соответствующих значений параметров модели турбулентности SST.

Для минимизации количества CFD расчетов при проведении исследования использовалась теория планирования эксперимента. При этом, вектором наблюдения является набор параметров модели турбулентности, а функцией отклика является отклонение значений потерь полученных расчетным и экспериментальным путем.

Определение сочетания параметров модели турбулентности, обеспечивающих наилучшее совпадение с экспериментом производилось по следующей методике:

- определение варьируемых параметров;
- построение плана  $n$ -факторного эксперимента;
- проведение основных расчетов по плану;
- обработка данных, построение формальной макромодели;
- нахождение оптимальных значений варьируемых параметров;
- построение графиков зависимостей;
- проверочный расчет.

### Методические исследования

Предварительно были проведены проверочные расчеты с целью определения коэффициентов модели турбулентности наиболее существенно влияющих на характер обтекания при ненулевых углах атаки профиля и соответствующие потери. Были исследованы такие коэффициенты: Specified Intermittency, Production Limiters (Clip Factor), Eddy Viscosity, Turbulent Schmidt number, BC TKI Factor, A1 coefficient, BetaStar coefficient. После проведенного анализа для исследуемой модели было определено, что вектор наблюдения будет включать коэффициент перемежаемости (intermittency) и BetaStar.

*Коэффициент перемежаемости (intermittency)* учитывает переход от ламинарного течения к турбулентному, который не происходит моментально при достижении критического числа Рейнольдса.

Коэффициент перемежаемости задается в пределах от 0 до 1, где значению 0 соответствует полностью ламинарное течение, значению 1 полностью турбулентное.

*Коэффициент BetaStar.* В основе модели турбулентности SST Менгера лежат два уравнения [5].

Кинетическая энергия пульсационного движения

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right].$$

Удельная скорость диссипации энергии

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Здесь  $\beta^*$  – коэффициент BetaStar, по умолчанию равный 0,09.

Из уравнений видно, что коэффициент BetaStar прямо пропорционален энергии турбулентности  $k$ , следовательно, варьирование этим параметром может, в значительной степени, привести к изменению результатов CFD расчета.

Диапазоны варьирования коэффициентов определялись на основании проведенных методических исследований. При выборе границ диапазона главным фактором служила нормальная сходимость расчетного процесса (под нормальной сходимостью понимается достижение точности расчетного процесса до уровня  $10^{-7}$ ). Таким образом, для коэффициента перемежаемости этот диапазон составил (0,8–0,97), для коэффициента BetaStar (0,06–0,115).

### Основной расчет

В экспериментальных данных, которые были получены на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» [4], продувка профиля 1ММК осуществлялась при четырех различных углах натекания: 26,5°; 30,1°; 36,5°; 40°. Геометрический угол натекания для данного профиля составляет 29,5°.

В качестве плана численного эксперимента использовалось дополнение к планам Бокса-Бэнкена для двух варьируемых параметров, разработанное на кафедре турбиностроения НТУ «ХПИ» [6]. Такой план требует расчета 9 комбинаций значений варьируемых параметров.

В результате обработки плана была получена формальная макромодель в виде полинома второго порядка. Путем перебора комбинаций варьируемых параметров с использованием ЛП<sub>t</sub> последовательности были получены такие сочетания значений, при которых функция отклика была минимальной. Это позволило построить графики зависимостей коэффициента перемежаемости (рис. 1) и коэффициента BetaStar (рис. 2) от угла натекания потока.

Необходимо отметить, что данные графики не могут использоваться отдельно друг от друга, так как получены с условием взаимного влияния исследуемых коэффициентов модели турбулентности на профильные потери в решетке. Это означает, что для того чтобы получить наиболее близкий к эксперименту результат по профильным потерям необходимо для заданного угла определить коэффициент перемежаемости выбранный по графику на рис. 1 и коэффициент BetaStar выбранный по графику на рис. 2.

### Проверочные расчеты

В качестве проверочного расчета был реализован следующий алгоритм. Для каждого из проверенных экспериментально углов натекания по графикам зависимости коэффициента перемежаемости (рис. 1) и коэффициента BetaStar (рис. 2) от угла натекания были определены оптимальные соотношения этих коэффициентов, которые,

исходя из полученного решения, должны были обеспечить более лучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными. В полученных точках были проведены проверочные расчеты. Это позволило построить графики зависимости профильных потерь в канале от угла натекания (рис. 3).

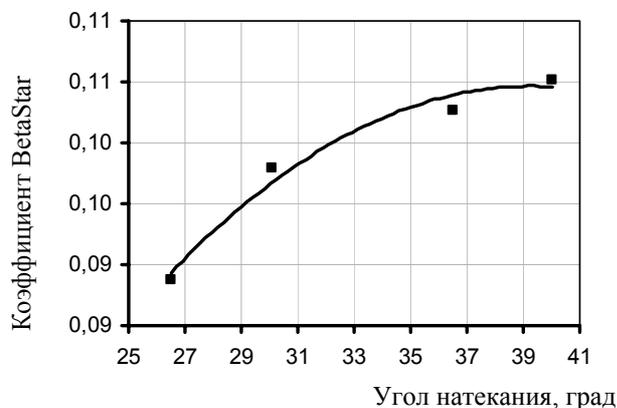


Рис. 1. Зависимость коэффициента перемежаемости от угла натекания потока

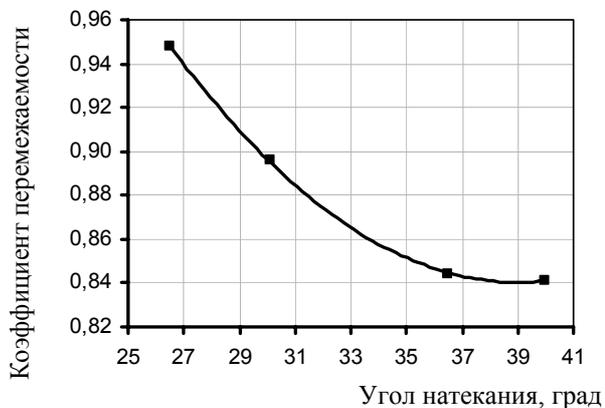


Рис. 2. Зависимость коэффициента BetaStar от угла натекания потока

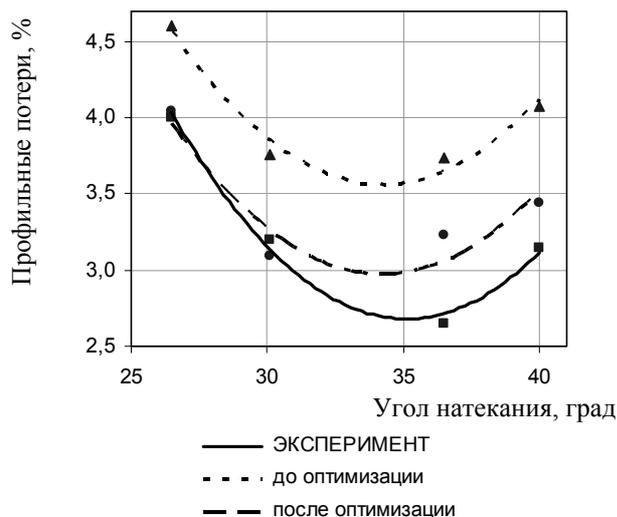


Рис. 3. Зависимость профильных потерь в канале до и после оптимизации

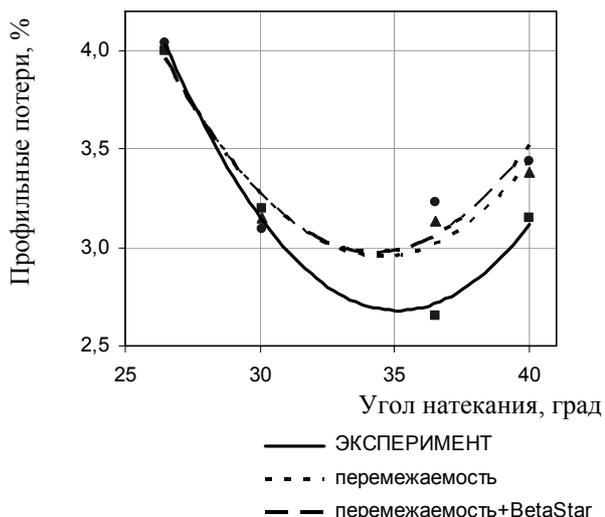


Рис. 4. Зависимость профильных потерь в канале при варьировании коэффициентом перемежаемости отдельно и в паре с коэффициентом BetaStar

Из графиков видно, что, действительно, варьирование указанными коэффициентами повлияло на более лучшее совпадение результатов эксперимента и расчета.

Однако, возникло сомнение в необходимости варьирования двумя коэффициентами одновременно. Чтобы проверить это предположение было решено повторить эксперимент для одного параметра – коэффициента перемежаемости (intermittency). Результаты этих расчетов приведены на графике (рис. 4).

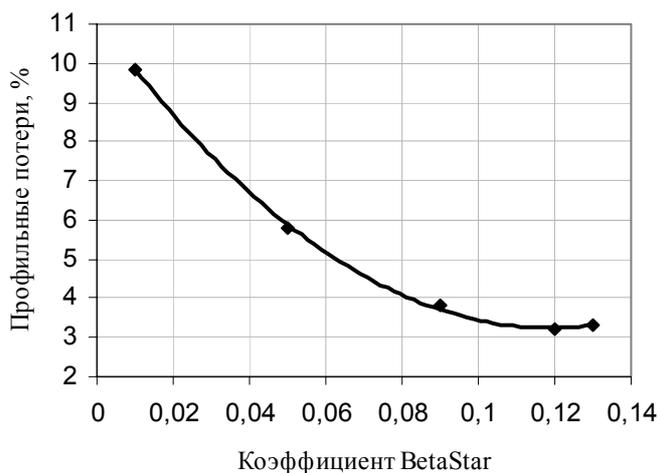


Рис. 5. Влияние коэффициента BetaStar на профильные потери в решетке при фиксированном угле натекания потока

Очевидно, что результаты однофакторного эксперимента, когда варьировался только коэффициент перемежаемости, и двухфакторного, когда варьировался коэффициент перемежаемости совместно с коэффициентом BetaStar, практически совпадают. Понять причину этого явления можно проанализировав влияние коэффициента BetaStar на профильные потери. Например, для угла натекания  $36,5^\circ$ .

Видно, что коэффициент BetaStar сильно влияет на потери в сторону их увеличения. Однако, в диапазоне который был определен

после оптимизации (0,09–0,11) влияние этого коэффициента на профильные потери в решетке минимально.

### Выводы

1. Разработана методика повышения точности CFD расчетов с использованием теории планирования эксперимента.
2. Показано, что для заданных граничных условий на результаты расчета течения в заданной решетке профилей 1ММК наиболее существенное влияние оказывают параметры модели турбулентности SST: коэффициент перемежаемости и коэффициент BetaStar.
3. Определены зависимости коэффициентов модели турбулентности от угла входа потока в решетку активного типа с профилями 1ММК, которые обеспечивают лучшее совпадение расчетных данных с экспериментальными.
4. Для более точного прогнозирования характера обтекания турбинных решеток при нерасчетных углах натекания требуется проведение дальнейших исследований с определением лучших значений других параметров CFD расчета по предложенной методике.

**Список литературы:** 1. Бойко А.В. Оптимального проектирования проточных частей осевых турбомашин – современное состояние / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, А.П. Усатый // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 6. – С. 14-21. 2. Бойко А.В. О возможности замены физического эксперимента на плоской решетке турбинных лопаток вычислительным / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, М.В. Бурлака // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – № 2. – С. 36-43. 3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с. 4. Мельтюхов В.А. Оценка качества новых турбинных решеток профилей для режимов диффузорного и конфузорного течений: Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1986. 5. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. – Vol. 32. – No. 8, August 1994. – PP. 1598-1605. 6. Усатый А.П. Оптимизация ЦВД мощных паровых турбин: Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: ХПИ, 1988. – 187 с.

© Бойко А.В., Бурлака М.В., Максютя Д.И., 2011  
Поступила в редколлегию 01.03.11