ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

Д.И. Крупнов, **М.Г. Черкасова**

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, cherkasova_mg@powerm-m.ru

Первая ступень турбины газотурбинной установки средней и большой мощности работает в условиях высоких температур, достигающих 1500°С и более. Для обеспечения работоспособности лопаток первой ступени применяется развитая система охлаждения, в частности, пленочно-конвективная. Так как экспериментальные исследования пленочно-конвективного охлаждения для каждой отдельной лопатки турбины являются дорогостоящими и имеют ограничения, которые не всегда дают возможность определить все необходимые параметры обтекания и теплового состояния лопатки, то использование вычислительных средств моделирования течения газов является целесообразным.

На предприятиях, при проектировании лопаток с конвективно-пленочным охлаждением, как правило, используется саморазработанное ПО, основанное на эмпирических данных экспериментальной базы, наработанной более 50 лет назад. Данное ПО отлично подходит для расчета конвективной системы охлаждения, но не учитывает весь спектр направлений и скоростей охлаждающего воздуха, при его выпуске на наружную поверхность профиля.

Данное обстоятельство становится критичным при исследовании теплового состояния лопаток с отверстиями на профиле направленными друг на друга (рис. 1). Отсутствие учета направления движения охлаждающего воздуха на наружной поверхности лопатки приводит к равномерному распределению теплового состояния лопатки по ее высоте, в то время как встречные потоки воздуха могут образовывать захоложенные области (рис. 2) и формировать вихревые жгуты, распространяющиеся вдоль всего профиля лопатки.

Локальные минимумы и максимумы температуры на поверхности лопатки могут оказывать значительное влияние на ее

прочность, поэтому должны быть учтены при проектировании системы охлаждения.

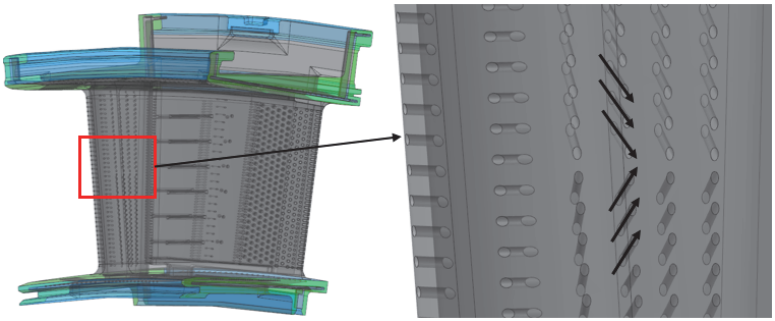

Рис. 1. Встречное направление отверстий в системе охлаждения первой сопловой лопатки турбины

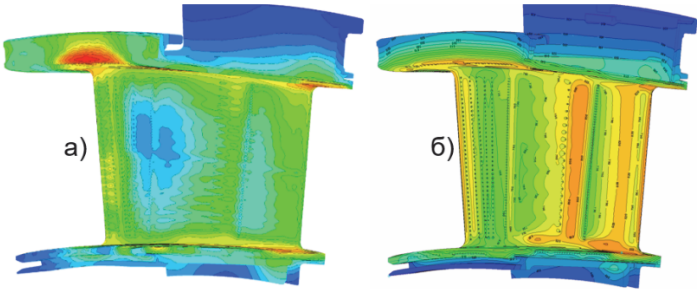

Рис. 2. Сравнение теплового состояния лопаток полученного с учетом направления движения охлаждающего воздуха вдоль профиля лопатки (а) и без (б)

Для определения параметров расчетной модели по оценке теплового состояния лопатки турбины в программе ANSYS CFX был проведен ряд расчетов. Одна часть расчетов была выполнена для реальной геометрии лопатки, другая часть – для плоской пластины. Расчеты для плоской пластины позволили за короткое время проанализировать влияние большого количества параметров. Для оценки результатов расчетов проводилось сравнение с экспериментальными данными. Данные для лопатки получены в ходе тепло-гидравлических «горячих» испытаний, данные для плоской пластины заимствованы из исследований [1, 2].

При проведении расчетов варьировались такие параметры как: число элементов сеточной модели (грубая, средняя, подроб-

ная), модели турбулентности (k-O SST, k-E, SAS), качество разрешения пограничного слоя (ПС), фактор роста ячеек, углы выпуска воздуха по отношению к наружной поверхности (30°, 60°, 90°), интенсивность выдува (0,33; 1,33; 2).

На рис. 3 и 4 представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных. Сравнение проходило по распределению коэффициента охлаждения θ вдоль профиля лопатки на среднем диаметре и вдоль пластины. Коэффициент θ вычислялся как разница между температурой газа и температурой металла лопатки отнесенная к разнице между температурой газа и температурой охлаждающего воздуха.

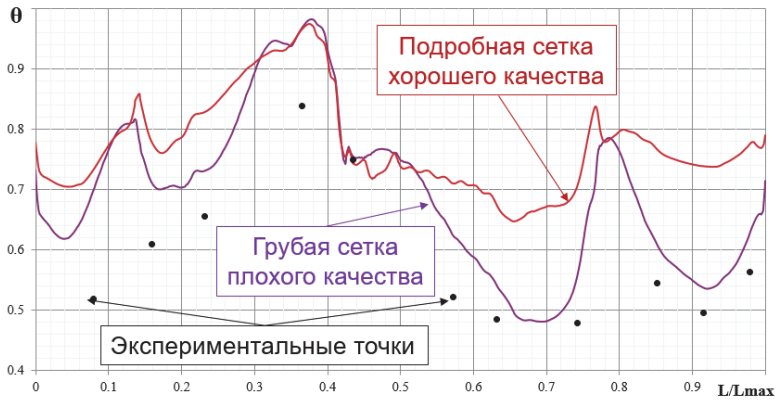

Рис. 3. Распределение коэффициента эффективности охлаждения вдоль профиля лопатки

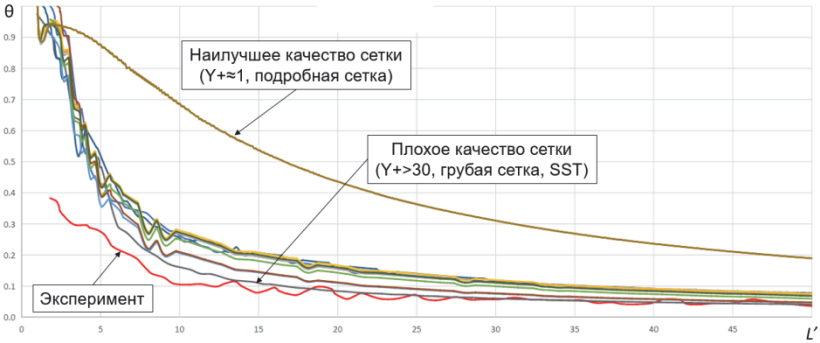

Рис. 4. Распределение коэффициента эффективности охлаждения вдоль пластины при различных сеточных параметрах

При расчете лопатки были рассмотрены две сеточные модели – грубая, сделанная в короткие сроки, с некачественно разрешенным ПС, при этом в некоторых местах на поверхности лопатки ПС отсутствовал вовсе; подробная с большим количеством элементов, качественным пограничным слоем Y+ меньше 1.

При исследовании плоской пластины выполнено больше 10 расчетов с различными параметрами сетки от самой грубой (Y+ больше 30, минимальная ячейка 5, максимальная 20, k-O SST, 5 слоев ПС) до самой подробной (Y+ меньше 2, минимальная ячейка 0,5, максимальная 5, k-O SST, 20 слоев ПС).

Из сравнения наглядно видно, что чем лучше разрешение сеточной модели, тем больше результаты расчета отклоняются от экспериментальных данных. Это справедливо как для исследования лопатки, так и для плоской пластины. Для плоской пластины два крайних по качеству варианта очертили область куда легли все промежуточные кривые. При этом в месте самого выпуска воздуха на поверхность пластины, θ на всех исследованных вариантах имеет крайне высокие значения не соответствующие экспериментальным данным.

Таким образом, оценка пленочно-конвективного охлаждения лопаток турбины расчетными методами прямого моделирования остается нерешенной задачей. Необходимо дальнейшая работа по подбору сеточных параметров и параметров решателя или уточнение физики процессов, заложенных в программных комплексах.

Литература

1. C.H.N. Yuen, and Martinez-Botas., Film Cooling Characteristics of a Single Round Hole at Various Streamwise Angles in a Crossflow: Part I Effectiveness, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 46 (2003) 221-235.
2. C.H.N. Yuen, and Martinez-Botas, Film Cooling Characteristics of Rows of Round Holes at Various Streamwise Angles in a Crossflow: Part I. Effectiveness, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 48 (2005) 4995-5016.