

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА В КАЧЕСТВЕ ОХЛАДИТЕЛЯ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ПГУ

АННОТАЦИЯ

В работе представлено сравнение результатов экспериментального и численного исследования завесного охлаждения пластины двумя хладагентами: воздухом и водяным паром. Экспериментальное определение эффективности завесного охлаждения проведено с использованием жидкокристаллических термоиндикаторных покрытий. Расчеты эффективности охлаждения выполнены в программе FLUENT.

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке ПГУ нового поколения возникает ряд научных и технических проблем, основной из которых является создание высокоэффективных систем охлаждения лопаток турбин. Система охлаждения должна обеспечивать приемлемую, по условиям термостойкости, температуру стенки лопатки в течение длительного ресурса работы (до 100 000 ч). При этом она должна компенсировать неравномерность распределения теплового потока по обводу профиля и обеспечивать допустимый градиент температур. На рис. 1 показано сравнение эффективности различных систем охлаждения и типов охладителя в зависимости от относительного расхода хладагента. Большие значения эффективности охлаждения при конвективном охлаждении воздухом достигаются при больших расходах охладителя. При введении конвективно-пленочного охлаждения можно несколько увеличить эффективность охлаждения. Однако приходится принимать дополнительные меры по снижению газодинамических потерь от выдува воздуха в проточную часть турбины. Применение пара, обладающего большей теплоемкостью, чем воздух, позволяет существенно увеличить эффективность охлаждения при одном и том же расходе хладагента, или снизить расход при неизменной температуре лопатки.

Завесное охлаждение, с использованием воздуха, уже зарекомендовало себя, как надежный способ охлаждения лопаток турбин ГТД. Исследователями накоплен достаточно обширный материал по экспериментальному и численному исследованию влияния на эффективность воздушной завесы таких факторов как число Рейнольдса, градиента давления, кривизны поверхности, уровня турбулентности потока, неравномерности профилей скорости и температуры, получены эмпирические зависимости для расчета эффективности завесного охлаждения. Однако если взять в качестве охладителя водяной пар, то для проектирования такой системы охлаждения

практически нет информации о влиянии различных факторов на эффективность парового завесного охлаждения.

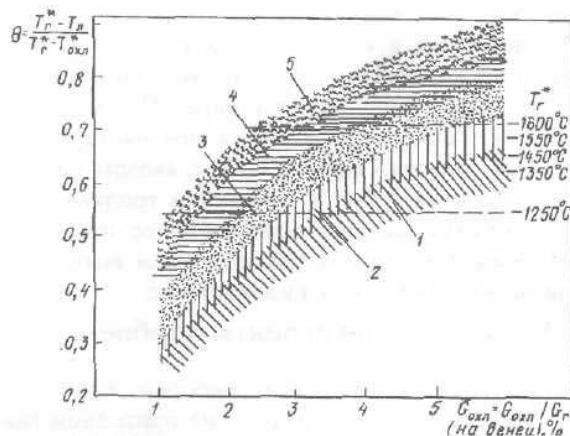


Рис. 1. Зависимость эффективности различных способов охлаждения от относительного расхода: 1 — конвективное охлаждение (воздух); 2 — конвективно-заградительное (воздух); 3 — конвективно-заградительное (пар); 4 — пористое (воздух); 5 — пористое (пар). Оценки T_g^* выполнены при $T_{л^*}=1023\text{K}$ (750°C) и $T_{охл^*}=623\text{K}$ (350°C) — перегретый пар 7 МПа и охлаждающий воздух

Для оптимального проектирования системы охлаждения турбины водяным паром, необходимо получение дополнительных сведений о структуре течения в межлопаточном канале при наличии вдува пара. Цель данной работы — обосновать применение водяного пара для завесного охлаждения, определить основные отличия воздушной и паровой завесы, а также определить возможность переноса результатов экспериментов полученных с воздушной завесой на паровую.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Для экспериментального определения эффективности завесного охлаждения на пластине использовался метод жидкокристаллических термоиндикаторов [1]. Эксперимент проводился для двух случаев: в первом случае в качестве охладителя использовался воздух, во втором случае — водяной пар.

Рабочая часть установки выполнена из текстолита и представляет канал прямоугольного поперечного сечения, на нижней поверхности которого организовывалось завесное охлаждение. Завеса созда-

вадась тремя отверстиями диаметром 3 мм, расположенными под углом 30° к поверхности. Отношение длины отверстия к его диаметру составляло 2,5. Поверхность за отверстиями покрывалась тонким слоем жидких кристаллов. Основной поток нагревался до 100°С и подавался в рабочую часть установки. Водяной пар генерировался в парогенераторе при 100°С, а затем подогревался в теплообменнике до 150°С. В начале, для установления поля течения, в качестве завесы подавался пар при 110°С. Жидкокристаллические термоиндикаторы подобраны таким образом, чтобы температура их перехода равнялась 120°С, поэтому процесс установления течения проходил при температуре меньшей температуры перехода. По истечении промежутка времени, необходимого для установления течения, температуру пара плавно увеличивали до 150°С и на поверхности пластины проявлялись изотермы, соответствующие равенству температуры поверхности пластины температуре перехода жидких кристаллов. В ходе эксперимента проводилась цифровая видеосъемка процесса проявления изотерм, а также регистрация температур основного потока и потока охладителя. При обработке полученных результатов эффективность охлаждения определялась в виде:

$$\theta = \frac{T_{\text{жк}}(t) - T_{\text{осн}}^*}{T_{\text{охл}}^*(t) - T_{\text{осн}}^*}$$

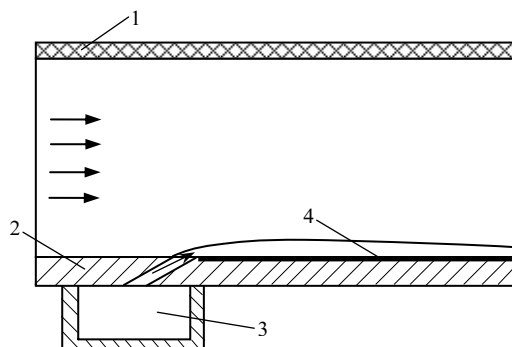


Рис. 2. Схема рабочей части установки: 1 – смотровое окно; 2 – охлаждаемая стенка; 3 – камера нагнетания охладителя; 4 – слой жидких кристаллов

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 3.

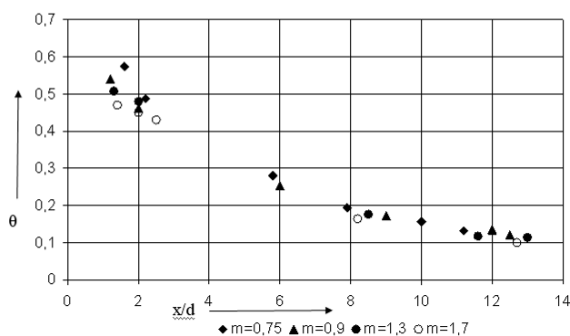


Рис. 3. Эффективность завесного охлаждения на осевой линии в зависимости от расстояния вниз по потоку (воздух)

3. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАВЕСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Геометрия расчетной области воспроизводит рабочую часть экспериментальной установки и изображена на рис. 4. Сетка построена в программе GAMBIT и насчитывает 35 000 ячеек. Расчет выполнен в программе FLUENT для двух случаев: в первом случае в качестве охладителя использовался воздух, а во втором случае – водяной пар. В расчете использовалась k-ε модель турбулентности.

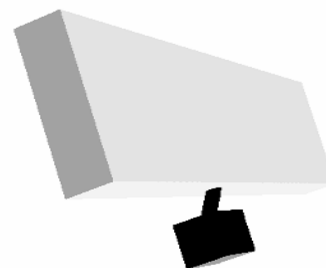


Рис. 4. Геометрия расчетной области

На рис. 5–7 представлены результаты расчета, в котором в качестве охладителя использовался воздух с температурой 350°С, температура основного потока 1227°С, параметр ддува равен 0,6.

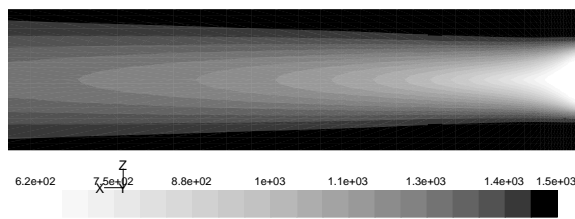


Рис. 5. Распределение температуры поверхности пластины

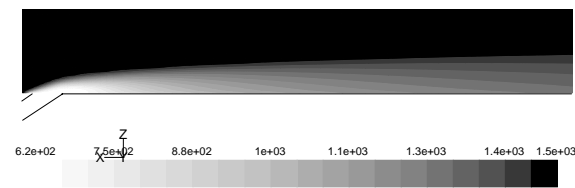


Рис. 6. Распределение полной температуры потока в плоскости перпендикулярной поверхности пластины

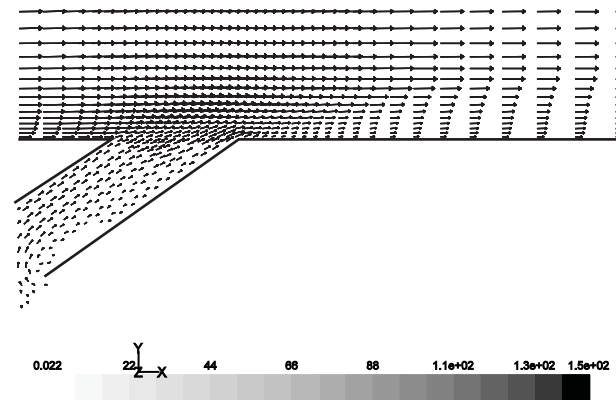


Рис. 7. Вектора скорости в плоскости перпендикулярной поверхности пластины

На рис. 8–10 представлены результаты расчета, в котором в качестве охладителя использовался перегретый водяной пар с температурой 350°C, температура основного потока – 1227°C. Граничные условия в камере подвода охладителя подобраны таким образом, чтобы параметр вдува соответствовал параметру вдува при расчете с воздухом и составил 0,6.

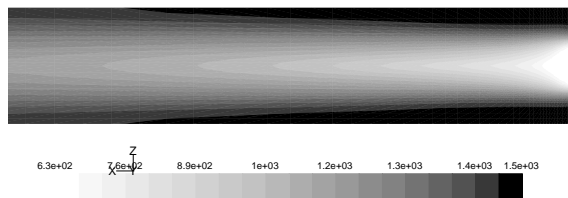


Рис. 8. Распределение температуры поверхности пластины

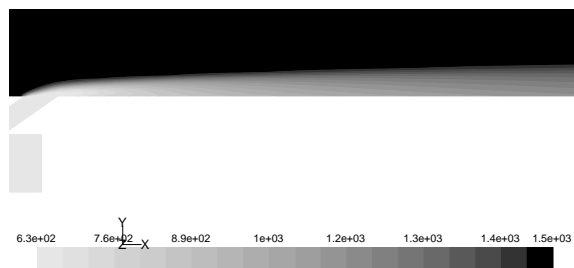


Рис. 9. Распределение полной температуры потока в плоскости перпендикулярной поверхности пластины

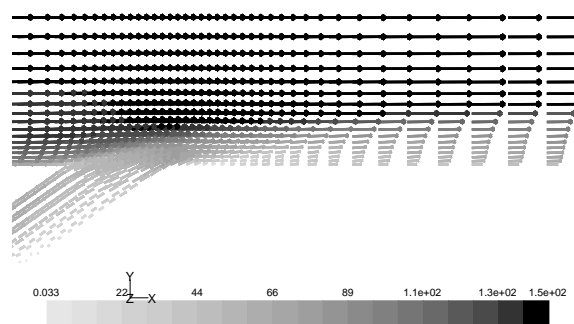


Рис. 10. Вектора скорости в плоскости перпендикулярной поверхности пластины

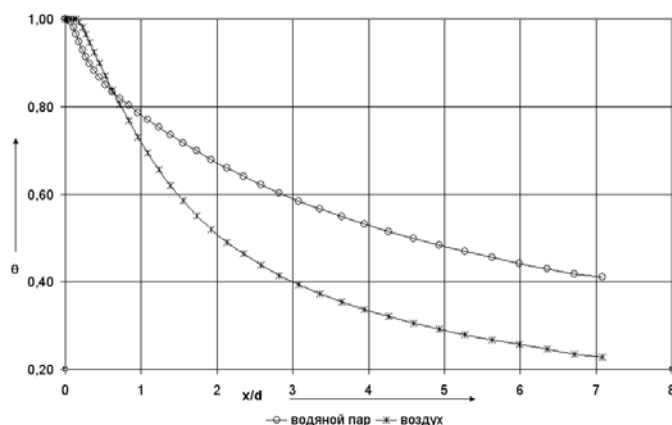


Рис. 11. Сравнение расчетной эффективности охлаждения на осевой линии за отверстием для водяного пара и воздуха

Из рис. 11 видно, что непосредственно за отверстием эффективность воздушной завесы выше паровой, однако это имеет место только на небольшом

удалении от отверстия ($x/d < 1$). В остальной области течения эффективность паровой завесы заметно выше воздушной и с удалением от отверстия разница становится более существенной (достигает величины 0,2). В остальном, структура течения практически не изменяется, что видно из сравнения полей векторов скорости.

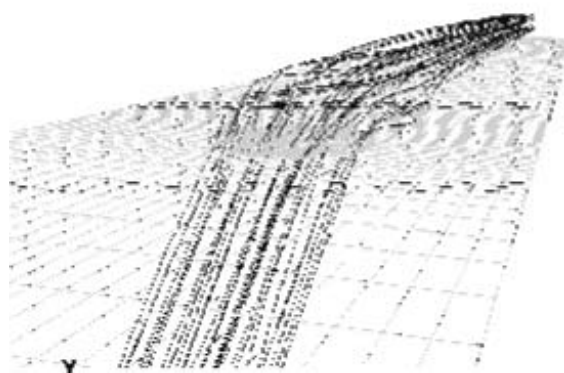


Рис. 12. Линии тока паровой завесы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая выше приведенные результаты можно прийти к выводу, что большие значения эффективности охлаждения достигаются при использовании в качестве охладителя водяного пара. Структура течения завесы при переходе с воздуха на пар существенных изменений не претерпевает, однако вследствие разности плотностей воздуха и водяного пара, для равенства параметра вдува приходилось уменьшать давление пара в камере подвода. Необходимо получение дополнительных экспериментальных данных об эффективности парового завесного охлаждения и проведение серии тестовых расчетов на разных режимах по параметру вдува для выявления аналогии полей эффективности воздушной и паровой завес.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №05–08–33942.

СПИСОК ОБЗНАЧЕНИЙ

T – температура, К;

θ – эффективность охлаждения.

Индексы:

осн – параметр основного потока;

жк – значение параметра соответствующее переходу жидких кристаллов;

охл – параметр охладителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vogel G., Graf A., Weigand D. Film Cooling: A comparative study of different heater-foil configurations for liquid crystals experiments // GT-2002-30552, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, 2002.
2. Батенин В.М., Зейгарник Ю.А., Копелев С.З., и др. Парогазовая установка с вводом пара в газовую турбину – перспективное направление развития энергетических установок // Теплоэнергетика. № 10. 1993. С. 46–52.