

## **Экспериментальное исследование характеристик теплообмена во внутренних каналах систем охлаждения турбомашин при использовании термохромных жидких кристаллов 77-30569/256283**

# 01, январь 2012

Байбузенко И. Н., Седлов А. А., Иванов В. Л., Щеголев Н. Л.

УДК 621.438

УДК 536.24

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[Igor.Baibuzenko@gmail.com](mailto:Igor.Baibuzenko@gmail.com)

[gasturbines@mail.ru](mailto:gasturbines@mail.ru)

[VadimLIvanov@yandex.ru](mailto:VadimLIvanov@yandex.ru)

### **Введение**

Создание отечественных высокотемпературных газотурбинных установок усовершенствованного цикла нового поколения единичной мощностью до 300 МВт, ставит задачу разработки и анализа эффективных систем охлаждения лопаточных аппаратов газовых турбин, работающих в условиях высокоэнтальпийного воздействия газовых сред при высоких давлениях. Так как лопаточные аппараты первых ступеней газовых турбин работают при температурах значительно выше температуры термической стабильности материалов, для гарантии надежной работы этих компонентов в течение длительного периода эксплуатации, необходима разработка все более эффективных систем охлаждения, а также методов их расчета и валидации. Один из современных подходов для определения локальных коэффициентов теплоотдачи, является нестационарный метод при использовании термохромных жидких кристаллов (ТЖК). Данный метод позволяет получить подробное локальное распределение коэффициентов теплоотдачи на поверхностях сложной формы (таких как, например, внутренние каналы охлаждения лопаток газовых турбин) с высокой экспериментальной точностью (погрешность менее 10 %) [1],[2].

Метод основан на скачкообразном изменении температуры рабочей среды на входе в экспериментальную модель и мониторинге по времени цветовой индикации внутренних поверхностей модели, покрытых ТЖК. Так как, цветовой отклик ТЖК непосредственно отражает температуру в конкретный момент времени, локальные значения коэффициентов теплоотдачи могут быть вычислены, используя эти данные, совместно с историей температуры жидкости. Тестовая модель выполняется из плексигласа для получения оптического доступа извне и записи цветového отклика ТЖК по времени при использовании видеокамеры.

В работе представлена реализация методики определения локальных значений коэффициентов теплоотдачи при использовании термохромных жидких кристаллов для внутренних каналов систем охлаждения газовых турбин. Приводится описание экспериментальной установки и методики обработки результатов измерений.

### **Экспериментальный стенд и измерительное оборудование**

Экспериментальный стенд для определения коэффициентов теплоотдачи во внутренних каналах схематично изображен на рис.1. Общий вид представлен на рис.2. Воздух нагнетается вентилятором 1, проходит через нагреватель 2 мощностью 3 кВт и попадает на мерный участок. Мерный участок представляет собой прямоугольный канал с поперечным сечением 150x100 мм. Благодаря возможности частичной разборки, в канале могут быть реализованы различные способы интенсификации теплообмена, такие как, например, поперечные ребра с различными поперечными шагами, углами установки и поперечным сечением. Канал условно разделен входной и на рабочий участки.

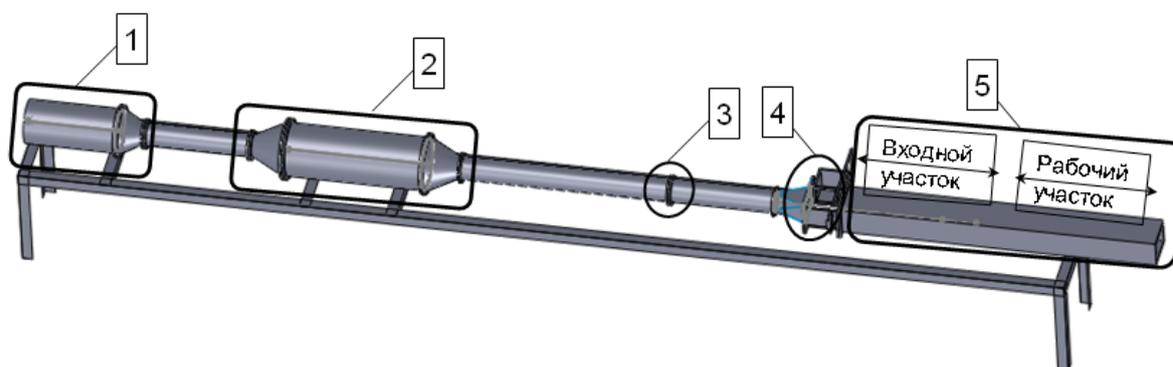


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для определения коэффициентов теплоотдачи



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда

Концепция экспериментального стенда, предполагает также изучение локальных характеристик теплообмена при натекании системы струй на поверхность, при варьировании различных геометрических параметров как отверстий, формирующих систему струй, так и поверхностей натекания. Это легко достигается заменой экспериментального участка.

Тестовая модель выполняется из низко-теплопроводного материала, как правило, плексигласа, а толщины стенок экспериментального участка выполняются достаточно толстыми (15 мм) чтобы обеспечить повышенное термической сопротивление модели и не допустить конвективного теплообмена на внешней поверхности мерного участка (формула 1) [3].

$$\frac{\lambda_{ст}}{(\rho \cdot c_p)_{ст}} \frac{t_{max}}{b_{ст}^2} < \frac{1}{4}, \quad (1)$$

где  $t_{max}$  — максимальная длительность измерительного цикла

При пуске воздух, пройдя вентилятор и нагреватель, поступает в обвод мерного участка и сбрасывается в окружающее пространство. После выхода на стационарный температурный режим нагревателя, воздух направляется на мерный участок посредством переключения заслонки перепускного устройства 4 изображенного на рис. 3а.

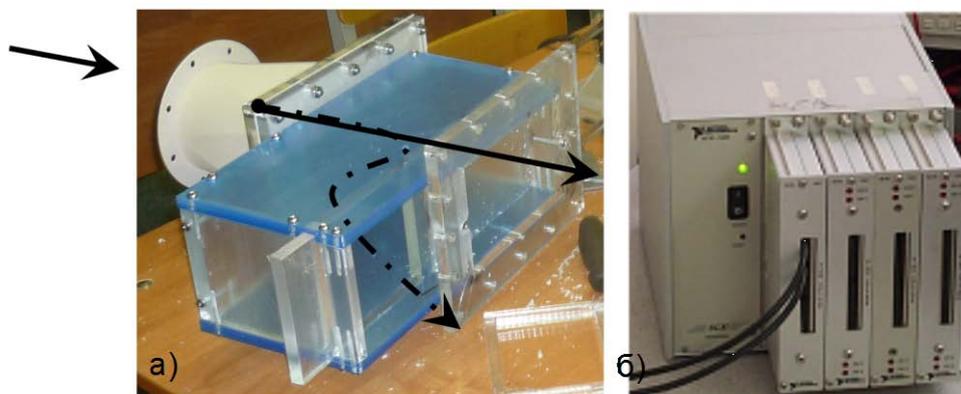


Рис. 3. а) Перепускное устройство, б) система обработки данных

Измерение расхода производится с помощью мерной шайбы 3. Для измерения температуры и давления воздуха по тракту используется высокопроизводительная многоканальная система сбора и обработки данных SCXI National Instruments (рис. 3б). В общей сложности задействовано 64 канала для согласования и коммутации сигналов от термопар и электронных датчиков давления.

На мерном участке для определения температуры поверхности стенки нанесен тонкий слой ТЖК. Их принцип действия состоит в способности менять ориентацию молекул в зависимости от температуры, по-разному отражая и пропуская свет. Для проведения эксперимента используются трехцветные ТЖК фирмы Hallcreast с малым температурным диапазоном. Их стандартная цветовая индикация изображена на рис. 4.

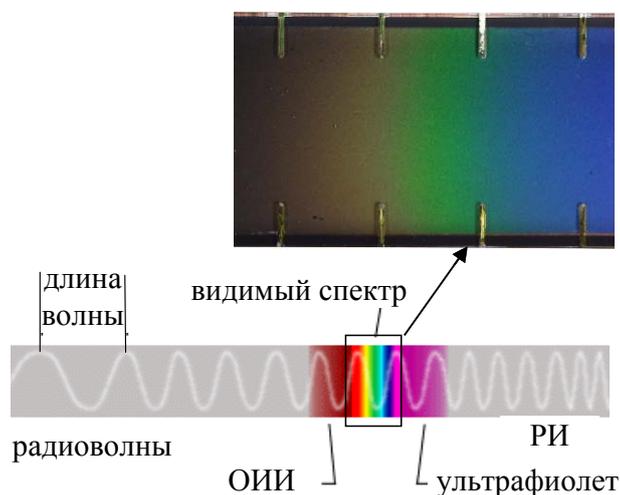


Рис. 4. Спектральные характеристики термохромных жидких кристаллов

### Обработка результатов эксперимента

Принимая, что поперечный градиент температуры значительно меньше продольного [4], для определения коэффициентов теплоотдачи может быть использовано аналитическое решение одномерной задачи теплопроводности в твердом теле. Для этого случая решается уравнение Фурье, в постановке, что стенка модели является полубесконечной, при равномерном распределении температуры в начальный момент времени. На поверхности приложены конвективные граничные условия. Дифференциальное уравнение решается при условии независимости свойств от температуры (и, таким образом, от времени), что допустимо при малых

температурных напорах между стенкой и воздухом, устанавливаемых в процессе эксперимента (20-25 °С).

$$\frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial t} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{(\rho c_p)_{\text{ст}}} \cdot \frac{\partial^2 T_{\text{ст}}}{\partial y^2} \text{ при } 0 \leq y < \infty, \quad (2)$$

при начальных и граничных условиях:

$$t = 0: T_{\text{ст}} = T_0,$$

$$y = 0: -\lambda \left( \frac{\partial T_{\text{ст}}}{\partial y} \right) = \alpha \cdot (T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}), \quad y \rightarrow \infty: T_{\text{ст}} = T_0, \text{ .}$$

Для случая ступенчатого изменения температуры среды по времени ( $T_{\text{ж}}$  при  $t=0$  с), и принимая, что коэффициент теплоотдачи не зависит от температуры, решение уравнения 1 представляется в виде [4]:

$$T_{\text{ст}} - T_0 = \sum_{j=1}^N \left[ 1 - e^{\beta^2} \cdot \text{erfc}(\beta) \right] \cdot \Delta T_{\text{ж}(j,j-1)},$$

где 
$$\beta = \alpha \cdot \sqrt{\frac{t - \tau_j}{(\rho c_p \lambda)_{\text{ст}}}}, \quad (3)$$

Значения локальных коэффициентов теплоотдачи определяется путем численного решения уравнения 3 при использовании метода Ньютона. Пример результатов измерений и обработки коэффициентов теплоотдачи в оребренных внутренних каналах представлен на рис. 5.

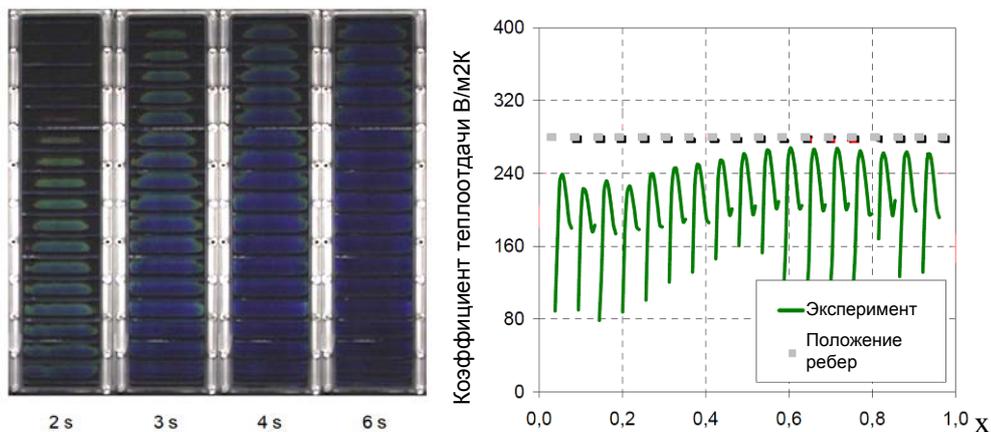


Рис. 5. Пример результатов измерения и их обработки [2]

## **Заключение**

В работе была описана методика определения локальных значений коэффициентов теплоотдачи при использовании термохромных жидких кристаллов, приведена принципиальная схема и техническая реализация экспериментального стенда, описание измерительного оборудования. Приведена методика сбора и обработки данных для вычисления локальных коэффициентов теплоотдачи. Данная методика может быть использована для определения характеристик теплообмена во внутренних каналах систем охлаждения турбомашин.

## **Список литературы**

- [1] Hoefler, F., [и др.], Heat Transfer Characteristics of an Oblique Jet Impingement Configuration in a Passage with Ribbed Surface, Journal of Turbomachinery, труды ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT2010-22288, 2010
- [2] Jenkins, S.C., [и др.], Transient Thermal Field Measurements in a High Aspect Ratio Channel Related to Transient Thermochromic Liquid Crystal Experiments, труды ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, GT2007-27812, 2007
- [3] von Wolfersdorf, J., Weigand, B., Turbine Blade Internal Cooling — Selected Experimental Approaches, VKI Lecture series, LS 2010-05, 2010
- [4] Ekkad, S. V., and Han, J.C., A Transient Liquid Crystal Thermography Technique for Gas Turbine Heat Transfer Measurements, Measurement Science and Technology, №11, с. 957-968, 2000

## **Experimental survey of heat transfer characteristics in inner channels of turbomachine cooling systems when using thermochromic liquid crystals**

**77-30569/256283**

**# 01, January 2012**

**Baibuzenko I.N., Sedlov A.A., Ivanov V., L., Schegolev N.L.**

Bauman Moscow State Technical University

[Igor.Baibuzenko@gmail.com](mailto:Igor.Baibuzenko@gmail.com)

[gasturbines@mail.ru](mailto:gasturbines@mail.ru)

[VadimLIvanov@yandex.ru](mailto:VadimLIvanov@yandex.ru)

The non-stationary method with the usage of thermochromic liquid crystals is one of the modern approaches to the heat transfer characteristics evaluation. It allows calculating the local heat transfer coefficients distribution in the inner channels of turbomachine cooling systems. The structural scheme and technical implementation of experimental stand are shown. The process of data collection and processing for computing of local heat transfer coefficients was described.

---

**Publications with keywords:** [heat exchange](#), [themochromic liquid crystals](#), [test rig](#), [gas turbines](#), [cooling](#)

**Publications with words:** [heat exchange](#), [themochromic liquid crystals](#), [test rig](#), [gas turbines](#), [cooling](#)

---

### Reference

- [1] Hoefler, F., [i dr.], Heat Transfer Characteristics of an Oblique Jet Impingement Configuration in a Passage with Ribbed Surface, Journal of Turbomachinery, trudy ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, GT2010-22288, 2010
- [2] Jenkins, S.C., [idr.], Transient Thermal Field Measurements in a High Aspect Ratio Channel Related to Transient Thermochromic Liquid Crystal Experiments, trudy ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea and Air, GT2007-27812, 2007

- [3] von Wolfersdorf, J., Weigand, B., Turbine Blade Internal Cooling — Selected Experimental Approaches, VKI Lecture series, LS 2010-05, 2010
- [4] Ekkad, S. V., and Han, J.C., A Transient Liquid Crystal Thermography Technique for Gas Turbine Heat Transfer Measurements, Measurement Science and Technology, №11, s. 957-968, 2000